

УДК 546.261

СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ ИЗ РАЗНЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Т.С. Квашина, Ю.Л. Крутский, Н.Ю. Черкасова,
Р.И. Кузьмин, А.Г. Тюрин**

Новосибирский государственный технический университет

В статье представлены результаты исследования процесса синтеза высокодисперсного порошка карбида кремния комбинированием экзо- и эндотермических реакций (синтез из элементов и карботермическое восстановление) с использованием нановолокнистого углерода в качестве углеродного материала. Продукты реакции изучались рентгенофазовым и элементным анализами, сканирующей электронной микроскопией с применением локального энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Удельная поверхность образцов определена методом БЭТ. Термоокислительная стабильность изучена синхронной термогравиметрией (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрией (ДСК). Полученный при оптимальных условиях материал представлен одной фазой – карбидом кремния высокотемпературной модификации. Средний размер агрегированных частиц составил 3,3...4,2 мкм. Величина удельной поверхности образцов составляет до 5 м²/г. Содержание примесей незначительное. Оптимальные условия синтеза карбида кремния с использованием в качестве восстановителя и карбидизатора НВУ следующие: массовое соотношение реагентов по стехиометрии на карбид SiC, массовое соотношение шихт 1 : 1, проведение процесса в среде аргона при температуре 1800 °С.

Ключевые слова: карбид кремния, нановолокнистый углерод, карботермическое восстановление, синтез из элементов, характеристики.

DOI: 10.17121/1727-2769-2017-4-80-90

Введение

Неметаллические тугоплавкие соединения обладают такими свойствами, как высокая температура плавления, твердость, химическая инертность, благодаря чему они широко применяются в качестве основы конструкционных, полупроводниковых, жаропрочных и абразивных материалов. Одним из наиболее важных представителей соединений данного класса является карбид кремния. Наиболее перспективным направлением применения карбида кремния является ультравысокотемпературная керамика, использующаяся в таких областях, как авиация, космонавтика и энергетика [1, 2].

Основными способами получения карбида кремния являются карботермическое восстановление, проходящее с поглощением теплоты при температурах выше 2000 °С, синтез из элементов, который можно охарактеризовать как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), магнетермический синтез и осаждение из парогазовой фазы [3].

Промышленное производство карбида кремния во всем мире основано на восстановлении оксида кремния (кварцевого песка) углеродом. Процесс освоен и является высокопроизводительным. В России промышленное производство карбида кремния осуществляется на Волжском абразивном заводе. Карбид кремния получается в виде кристаллов размером 15...30 мм. Поэтому производство крупнозернистых порошков не является проблемой. Однако получение высокодис-

Работа выполнена в рамках гранта НГТУ № 024-НСГ-17, полученного Т.С. Квашиной (Научный руководитель доцент Ю.Л. Крутский).

© 2017 Т.С. Квашина, Ю.Л. Крутский, Н.Ю. Черкасова, Р.И. Кузьмин, А.Г. Тюрин

персных порошков трудоемко, поскольку связано с энергоемким измельчением и последующей длительной и многостадийной классификацией. По этой причине исследования в области получения карбида кремния в виде высокодисперсного порошка интенсивно изучаются.

Процесс карботермического восстановления исследован в ряде работ. Суммарная реакция [3]:



Считается [4], что при взаимодействии диоксида кремния с углеродом первоначально образуется летучий монооксид SiO, пары которого взаимодействуют с углеродом с образованием карбида кремния. В работе [5] диоксид кремния на первой стадии растворяли в этиловом спирте, далее к раствору добавляли активный углерод, после чего суспензию подвергали ультразвуковой обработке, высушивали и подвергали термообработке. Полученный материал характеризовался высоким значением удельной поверхности ($878 \text{ м}^2/\text{г}$), однако содержал значительное количество свободного углерода. Удаление его требовало дополнительной операции – выдержки на воздухе при 850°C . Синтез карбида кремния из шунгита описан в [6]. Перед термообработкой шунгита следовало длительное (20 часов) его измельчение. Содержание примесей (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , S и т. д.) в этом минерале достигало 9,4 % масс., поэтому, по мнению авторов, полученный карбид кремния может быть использован только для абразивной обработки. Нанопорошок карбида кремния со средним размером частиц 15 нм был получен при лазерной абляции смеси высушенного ксерогеля и нановолокнистого углерода [7]. Производительность процесса очень мала, что связано со значительными тепловыми потерями при лазерном нагреве образцов.

Синтез тугоплавких соединений и композитов на их основе возможно осуществлять методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Отечественные разработки по данной тематике сосредоточены в ИСМАН РАН. Сведения о синтезе карбида кремния из элементов приведены в [8]. Реакция карбидообразования:



Теплота образования карбида кремния ($71,90 \text{ кДж/моль} = 1798 \text{ кДж/кг}$ [3]) сравнительно невелика, поэтому для инициирования реакции карбидообразования требуется подогрев шихты. Карбид кремния низкотемпературной модификации ($\beta\text{-SiC}$) таким процессом был получен нагревом шихты пламенем горелки и в режиме теплового взрыва при микроволновом нагреве.

Получение карбида кремния возможно металлотермическим методом (в качестве металла-восстановителя использовался только магний). В публикации [9] мезопористый карбид кремния был получен взаимодействием нанокомпозита из синтезированного золь-гель способом мезопористого оксида кремния и полиакриламида с магнием. Синтез карбида кремния осуществлялся в среде аргона при температуре $550\text{--}600^\circ\text{C}$ в течение 6 часов. Средние размеры кристаллитов карбида кремния ($\beta\text{-SiC}$) составили 20 нм. В [10] наноразмерный (10...35 нм) карбид кремния был синтезирован взаимодействием магния с цеолитом и мезопористым углеродом. Предварительно из цеолита обработкой раствором NH_4Cl в течение 48 часов были удалены ионы щелочных и щелочноземельных металлов. Синтез карбида кремния осуществлялся в среде аргона при температуре 750°C в течение 6 часов. Далее в обоих случаях для удаления соединений магния (MgO , Mg_2SiO_4 и Mg_2Si) следовала многочасовая кислотная обработка. Сведения о содержании примесей в обеих публикациях не были приведены.

Синтез карбида кремния из парогазовой фазы описан в [11]. Процесс восстановления диоксида кремния пропаном осуществлялся в азото-водородном плаз-

менном потоке. Содержание тройного соединения состава $\text{SiC}_{0,95}\text{N}_{0,05}$ в продуктах реакции не превышало 93 % масс. Плазмохимическая установка (плазмометаллургический модуль) сложна по конструкции и в эксплуатации. В отходящих газах содержится токсичный цианистый водород.

Следует отметить, что в технологическом отношении и аппаратном оформлении наиболее перспективными методами получения карбида кремния являются эндотермическое карботермическое восстановление и экзотермический синтез из элементов [3].

В данной работе исследуется возможность объединения двух этих методов с целью получения высокотемпературной модификации карбида кремния при менее высоких температурах.

1. Материалы и методы исследования

В качестве восстановителя и карбидообразующего агента использовался гранулированный нановолокнистый углерод. Размер гранул варьировался в диапазоне 4...8 мм. Гранулы НВУ образованы плотно переплетенными волокнами с диаметром 30...100 нм. Гранулы сравнительно легко растираются в порошок. НВУ достаточно чист: находящиеся в нем примеси представляют собой остатки исходного катализатора (90 % масс. Ni/10 % масс. Al_2O_3); их содержание не превышает 1 % масс. Его удельная поверхность находится на уровне $150 \text{ м}^2/\text{г}$, т. е. существенно выше, чем у ламповой сажи [12].

Для приготовления шихт использовались оксид кремния аморфный ОСЧ 7-3, ТУ 6-09-3811–79, кремний технический КР00 по ГОСТ 2169–69 и НВУ (все реагенты измельчались и просеивались через сито 100 мкм). Все реагенты перед проведением экспериментов были высушены в печи при 100°C для удаления влаги. Шихты готовились в соответствии со стехиометрией обеих реакций и далее смешивались в массовых соотношениях карботермическое восстановление : синтез из элементов 0,25 : 0,75 (шихта № 1); 0,5 : 0,5 (шихта № 2); 0,75 : 0,25 (шихта № 3).

Термодинамическая температура начала восстановления (при давлении монооксида углерода 0,1 МПа), рассчитанная по справочным данным [3, 13], для реакции (1) приблизительно равна 1440°C . Для обеспечения полноты прохождения реакции (1) карбидообразования могут потребоваться более высокие температуры. По этой причине эксперименты были проведены при температурах, $^\circ\text{C}$: 1400, 1600 и 1800. Термообработка шихт выполнялась в индукционной печи в атмосфере аргона. Шихта массой примерно 20 г насыпалась в тигель из углерода, помещаемый в кварцевый реактор. Реактор вставлялся в многовитковый индуктор печи. Температура процесса измерялась пирометром. Время термообработки во всех случаях составляло 20 мин. После завершения реакции реактор охлаждался до комнатной температуры в потоке аргона и из него извлекались продукты реакции. Полнота прохождения реакции проводилась путем взвешивания шихты и продуктов реакции и сопоставления экспериментальных данных с расчетными. Продукты реакций исследовались рентгенофазовым анализом на дифрактометре ДРОН-3 с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Морфология поверхности и элементный состав образцов изучались на растровом электронном микроскопе (РЭМ) EVO50 XVP с приставкой для энергодисперсионного микроанализа X-Act. Определение текстурных характеристик образцов проводилось на приборе Quantachrom NOVA 2200e. Удельная поверхность рассчитывалась по многоточечному методу БЭТ. Седиментационный анализ (распределение размеров частиц) выполнялся на лазерном анализаторе частиц MicroSizer 201 ВА Инстру-

ментс. Термоокислительная стабильность образцов полученных карбидов определялась с использованием прибора синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 C *Jupiter*.

2. Обсуждение результатов

Условия проведения процессов синтеза представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Температурные условия термообработки шихт
Thermal conditions of load heat treatment

Состав шихт	Маркировка образцов	Температура, °C	Убыль массы расчетная, % масс.	Убыль массы экспериментальная, % масс.
0,25 : 0,75 (№ 1)	SiC-1-14	1400	25,9	5,1
	SiC-1-16	1600		6,1
	SiC-1-18	1800		20,3
0,50 : 0,50 (№ 2)	SiC-2-14	1400	41,2	10,1
	SiC-2-16	1600		44,0
	SiC-2-18	1800		46,9
0,75 : 0,25 (№ 3)	SiC-3-14	1400	51,2	8,2
	SiC-3-16	1600		30,9
	SiC-3-18	1800		36,7

В некоторых случаях (образцы SiC-2-16 и SiC-2-18) экспериментальные значения убыли массы незначительно превосходили расчетные. Возможная причина – частичная потеря диоксида кремния в виде летучего монооксида. Следует отметить, что во всех случаях температуры термообработки 1400 °C оказались недостаточными для полноты протекания реакции. Поэтому далее изучались образцы, полученные при более высоких температурах.

Результаты рентгенофазового анализа полученных образцов (рис. 1) показали, что во всех случаях был получен карбид кремния высокотемпературной модификации (α -SiC).

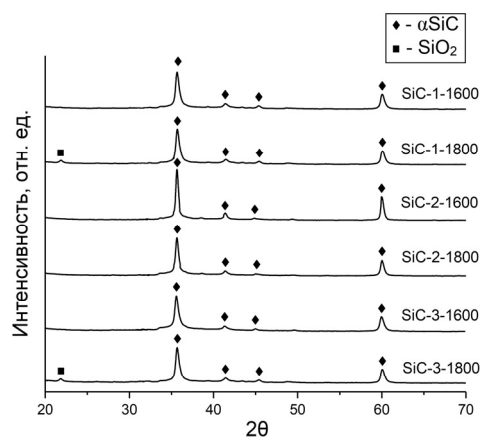


Рис. 1 – Результаты рентгенофазового анализа

Fig. 1 – Results of X-Ray phase analysis

Следует отметить, что образец SiC-3-18 содержал непрореагировавший диоксид кремния, что подтверждают результаты энергодисперсионного анализа, приведенные в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты энергодисперсионного анализа (состав приведен в % ат.)

Results of the energy-dispersive analysis (the unit of content is % at.)

Элемент	Образец					
	SiC-1-16	SiC-1-18	SiC-2-16	SiC-2-18	SiC-3-16	SiC-3-18
C	51,0	51,6	50,4	52,7	57,3	56,4
O	3,4	3,6	2,2	0,0	8,1	10,3
Si	44,5	43,9	45,4	45,8	33,2	32,1
Металлы катализатора	1,1	0,9	2,0	1,5	1,4	1,2

Энергодисперсионный анализ образцов показал, что почти во всех из них осталось небольшое количество непрореагировавшего диоксида кремния. Исключением является образец SiC-2-18. Также почти у всех образцов атомное соотношение углерода и кремния близко к расчетному, т. е. 1 : 1. Однако в каждом образце, по-видимому, осталось небольшое количество непрореагировавшего углерода.

Согласно результатам сканирующей электронной микроскопии, представленным на рис. 2, частицы карбида кремния, полученного при комбинировании методов, агрегированы, имеют ровные края, что свидетельствует о том, что они были синтезированы по химическим реакциям. Размеры частиц варьируются примерно от 0,4 до 20 мкм в зависимости от температуры процесса.

Характерной чертой полученных порошкообразных материалов является широкое распределение частиц по размерам и склонность к агрегации. Средний размер частиц полученных образцов варьируется от 3,3 до 4,2 мкм. Результаты данных по убыли массы, а также рентгенофазового и энергодисперсионного анализов показали, что лучшие результаты были достигнуты с образцами, полученными по второму методу (0,5 : 0,5). Для определения среднего размера частиц/агрегатов полученных образцов SiC-2-16 и SiC-2-18 были проведены расчеты по методике [14].

Результаты седиментационного анализа приведены в табл. 3.

Эти данные показывают следующее: увеличение температуры синтеза вызывает незначительное увеличение размеров частиц. Величины стандартного отклонения свидетельствуют о широком диапазоне распределения частиц и агрегатов по размерам (они «плохо отсортированы» или полидисперсны). Низкие значения показателей асимметричности – доказательство симметричности гистограмм.

Удельная поверхность образца SiC-2-16 составляет 8,2 м²/г, а образца SiC-2-18 немного ниже – 7,5 м²/г.

Дериватограммы образцов SiC-2-16 и SiC-2-18 приведены на рис. 4 и 5. Результаты показали, что образец SiC-2-18 содержит примерно 2,8 % углерода, который окисляется в промежутке температур 500...700 °С, что подтверждается экзопиком на кривой дифференциально-сканирующей калориметрии. Также у обоих образцов происходит незначительное увеличение массы, что свидетельствует о том, что в них присутствует компонент, способный окисляться при этих температурах (скорее всего кремний)

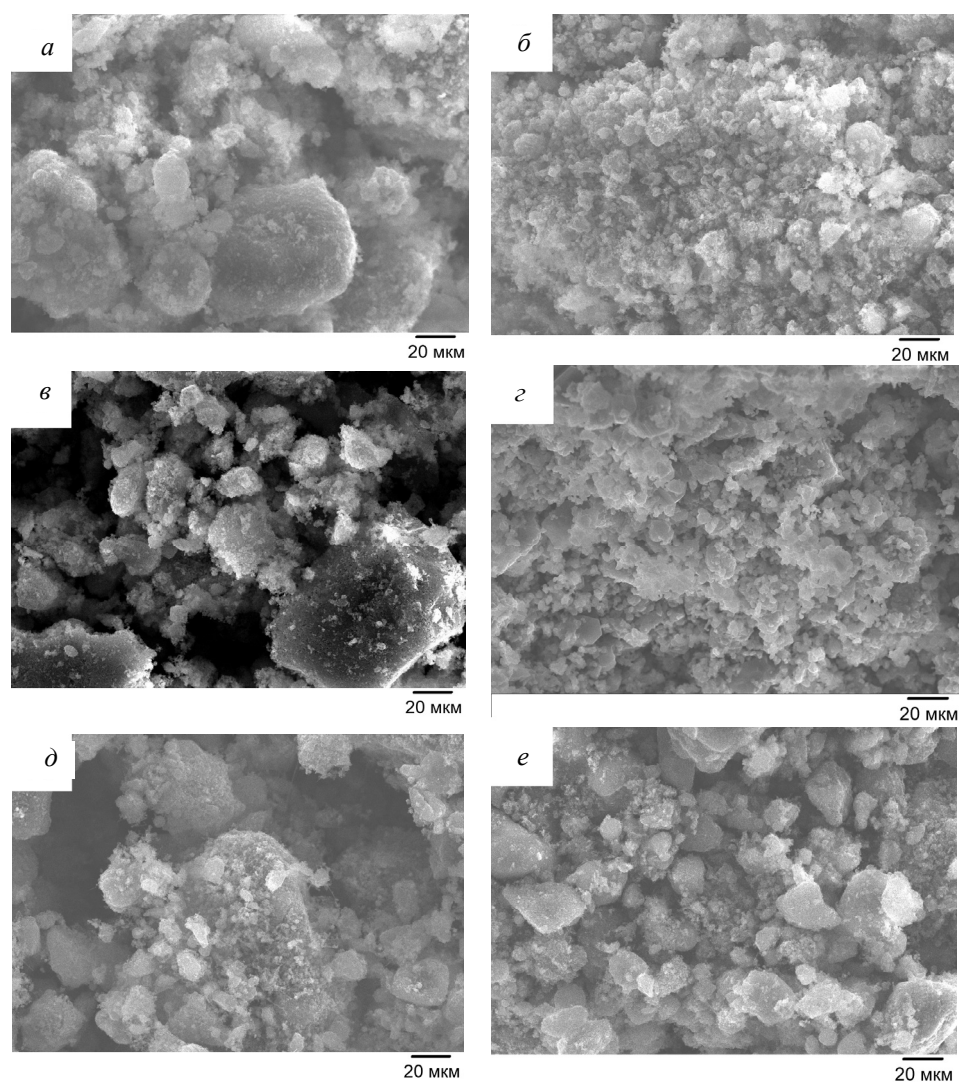


Рис. 2 – Результаты сканирующей электронной микроскопии:

a – SiC-1-16; *б* – SiC-1-18; *в* – SiC-2-16; *г* – SiC-2-18; *д* – SiC-3-16; *е* – SiC-3-18

Fig. 2 – Results of scanning electron microscopy:

a – is SiC-1-16; *б* – is SiC-1-18; *в* – is SiC-2-16; *г* – is SiC-2-18; *д* – is SiC-3-16; *е* – is SiC-3-18

Таблица 3 / Table 3

Результаты седиментационного анализа

Results of the sedimentary analysis

Образец	Средний размер частиц и агрегатов, мкм	Стандартное отклонение	Показатель асимметричности
SiC-2-16	3,3	3,15	–0,18
SiC-2-18	4,2	2,70	–0,24

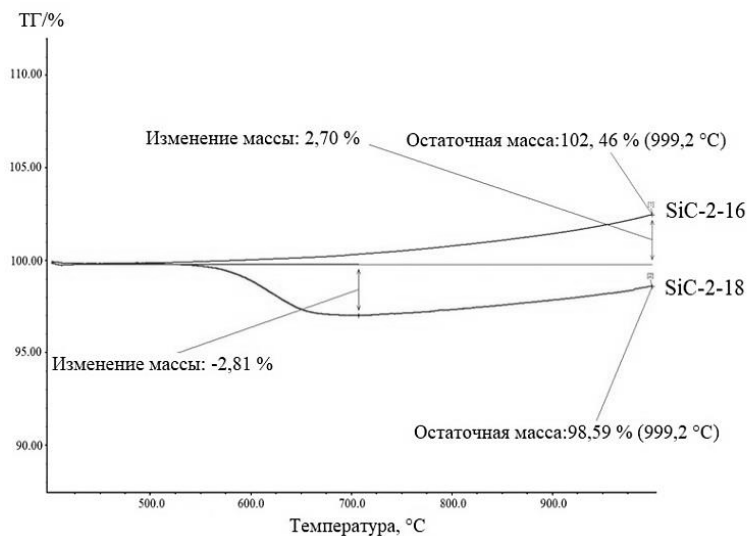


Рис. 4 – Результаты термогравиметрического анализа

Fig. 4 – Results of the thermogravimetric analysis

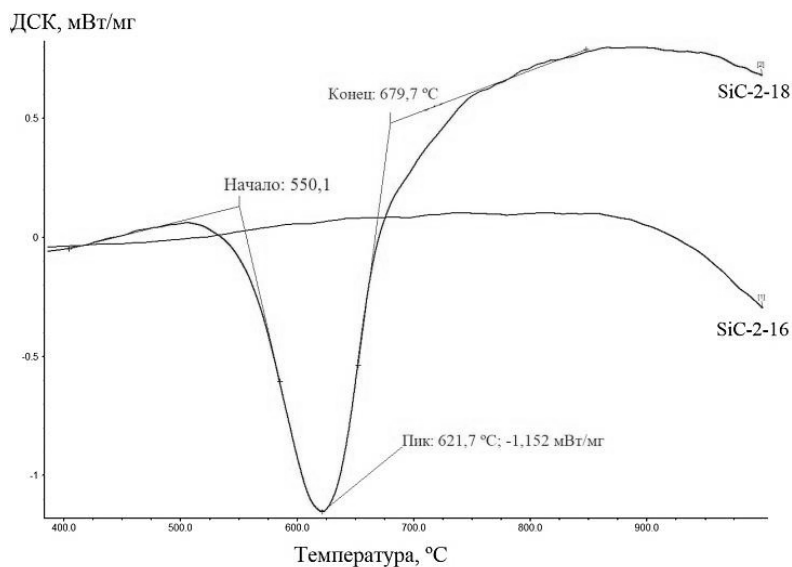


Рис. 5 – Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии

Fig. 5 – Results of differential scanning calorimetry

4. Заключение

Представлены результаты исследования процесса получения высокодисперсного порошка карбида кремния комбинированным методом (карботермическое восстановление и синтез из элементов одновременно) и изучения некоторых его характеристик и свойств. Синтез проводился в индукционной печи в среде аргона. Оптимальные параметры процесса: соотношение реагентов по стехиометрии на карбид кремния, время выдержки при температуре 1800 °C – 20 минут. Полученный

продукт содержит только одну фазу – карбид кремния α -SiC с незначительным содержанием примесей (на уровне 4 % масс.). По результатам растровой электронной микроскопии установлено, что частицы карбида кремния преимущественно агрегированы и имеют размеры 2...5 мкм. Величина удельной поверхности порошков карбида кремния в зависимости от времени синтеза составляет 7,5...8,2 м²/г. Средний размер агрегированных частиц по данным седиментационного анализа находится в диапазоне 3,3...4,2 мкм. Агрегированные частицы полидисперсны. Таким образом можно отметить, что комбинирование экзо- и эндотермических реакций с целью снижения температуры синтеза карбида кремния является эффективным для получения безразмольного высокодисперсного порошка карбида кремния с незначительным содержанием примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев О.Н. Керамика и керметы на основе бескислородных тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. – 2012. – № 11/12. – С. 100–116.
2. Monteverde F., Savino R., Fumo M.D.S. Dynamic oxidation of ultra-high temperature ZrB₂-SiC under high enthalpy supersonic flows // Corrosion Science. – 2011. – Vol. 53. – P. 922–929. – doi: 10.1016/j.corsci.2010.11.018.
3. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений / под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
4. Gruner W., Stolle S., Wetzig K. Formation of CO_x species during the carbothermal reduction of oxides of Zr, Si, Ti, Cr, W, and Mo // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. – 2000. – Vol. 18. – P. 137–145.
5. Sivasankaran S., Kumar K. A novel sonochemical synthesis of nano-crystalline silicon carbide ceramic powder and its characterization // International Journal of Recent Scientific Research. – 2015. – Vol. 6. – P. 2630–2633.
6. Low-temperature synthesis of silicon carbide powder using shungite / A. Gubernat, V. Pichor, R. Lach, D. Zientara, M. Sitarz, M. Springwald // Boletín de la Sociedad Española De Cerámica y Vidrio. – 2017. – Vol. 56, iss. 1. – P. 39–46.
7. Morphology of silicon carbide synthesized using laser ablation of a mixture of nanofibrous carbon with xerogel / G.G. Kuvshinov, Yu.L. Krutskii, A.M. Orishith, I.S. Chukanov, A.S. Varfolomeeva, Yu.V. Afonin, V.I. Zaikovskii, D.G. Kuvshinov // Nanotechnologies in Russia. – 2012. – Vol. 7. – P. 385–391.
8. Сычев А.Е., Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноматериалов // Успехи химии. – 2004. – Т. 73, № 2. – С. 157–170.
9. Low-temperature magnesiothermic synthesis of mesoporous silicon carbide from an MCM-48/polyacrilamid nanocomposite precursor / Z. Saeedifar, A.A. Nourbacksh, R.J. Kalbasi, E. Karamian // Journal of Materials Science and Technology. – 2013. – Vol. 29. – P. 255–260.
10. Hosseini B., Nourbacksh A.A., MacKenzie K.J.D. Magnesiothermal synthesis of nanostructured SiC from natural zeolite (clinoptilolite) and mesoporous carbon CMK-1 // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41. – P. 8809–8813. – doi: doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.107.
11. Полях О.А., Руднева В.В. Плазмометаллургическое производство карбида кремния для композиционного никелирования и хромирования. – М.: Наука, 2006. – 188 с.
12. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition / G.G. Kuvshinov, Yu.L. Mogilnykh, D.G. Kuvshinov, D.Yu. Yermakov, M.A. Yermakova, A.N. Salanov, N.A. Rudina // Carbon. – 1999. – Vol. 37. – P. 1239–1246.
13. Физико-химические свойства окислов: справочник / под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
14. Blott S.J., Pye K. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. – 2001. – Vol. 26. – P. 1237–1248.

SYNTHESIS OF HIGHLY DISPERSED SILICON CARBIDE FROM VARIOUS CHARGE MATERIALS

Kvashina T.S., Krutskii Yu.L., Cherkasova N.Yu.,
Kuzmin R.I., Tyurin A.G.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of a study of the synthesis of a highly dispersed silicon carbide powder by combining exo- and endothermic reactions (synthesis from elements and carbothermic reduction) using carbon nanofibers as carbon material. The reaction products were studied by the X-ray phase and elemental analyses as well as by scanning electron microscopy using the local energy-dispersive X-ray microanalysis. The specific surface of the samples was determined by the BET method. A sedimentation analysis was performed. The thermo-oxidative stability was studied by synchronous thermogravimetry (TG) and differential scanning calorimetry (DSC). The material obtained under optimal conditions is represented by one phase - high-temperature modification silicon carbide. An average size of aggregated particles is 6.3...7.2 μm . The specific surface area of the samples is up to 8 m^2/g . The content of impurities is insignificant (no more than 4 % by weight). Optimal conditions for the synthesis of silicon carbide with the use of NFC(s) as a reducing agent and carbidizer are the following: the mass ratio of reagents according to SiC carbide stoichiometry, the mass ratio of charges of 1:1, and the process in argon at 1800 °C.

Keywords: Silicon carbide, carbon nanofibers, carbothermic reduction, synthesis from elements, characteristics.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-80-90

REFERENCES

1. Grigor'ev O.N. Keramika i kermety na osnove beskislorodnykh tugoplavkikh soedinenii [Ceramics and cermets based on anoxic refractory compounds]. *Poroshkovaya metallurgiya – Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2012, no. 11/12, pp. 100–116. (In Russian).
2. Monte Verde F., Savino R., Fumo M.D.S. Dynamic oxidation of ultra-high temperature ZrB_2 –SiC under high enthalpy supersonic flows. *Corrosion Science*, 2011, vol. 53, pp. 922–929. doi: 10.1016/j.corsci.2010.11.018.
3. Kosolapova T.Ya., ed. *Svoistva, poluchenie i primeneniye tugoplavkikh soedinenii* [Properties, production and application of refractory compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 928 p.
4. Gruner W., Stolle S., Wetzig K. Formation of CO_x species during the carbothermal reduction of oxides of Zr, Si, Ti, Cr, W, and Mo. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2000, vol. 18, pp. 137–145.
5. Sivasankaran S., Kumar K. A novel sonochemical synthesis of nano-crystalline silicon carbide ceramic powder and its characterization. *International Journal of Recent Scientific Research*, 2015, vol. 6, pp. 2630–2633.
6. Gubernat A., Pichor V., Lach R., Zientara D., Sitarz M., Springwald M. Low-temperature synthesis of silicon carbide powder using shungite. *Boletín de la Sociedad Española De Cerámica y Vidrio*, 2017, vol. 56, iss. 1, pp. 39–46.
7. Kuvshinov G.G., Krutskii Yu.L., Orishith A.M., Chukanov I.S., Varfolomeeva A.S., Afonin Yu.V., Zaikovskii V.I., Kuvshinov D.G. Morphology of silicon carbide synthesized using laser ablation of a mixture of nanofibrous carbon with. *Nanotechnologies in Russia*, 2012, vol. 7, pp. 385–391.
8. Sychev A.E., Merzhanov A.G. Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyi sintez nanomaterialov [Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials]. *Uspekhi khimii – Russian Chemical Reviews*, 2004, vol. 73, no. 2, pp. 157–170. (In Russian).
9. Saeedifar Z., Nourbakhsh A.A., Kalbasi R.J., Karamian E. Low-temperature magnesiothermic synthesis of mesoporous silicon carbide from an MCM-48/polyacrilamid nanocomposite precursor. *Journal of Materials Science and Technology*, 2013, vol. 29, pp. 255–260.
10. Hosseini B., Nourbakhsh A.A., MacKenzie K.J.D. Magnesiothermal synthesis of nanostructured SiC from natural zeolite (clinoptilolite) and mesoporous carbon CMK-1. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 8809–8813. doi: doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.107.

11. Polyakh O.A., Rudneva V.V. *Plazmometallurgicheskoe proizvodstvo karbida kremniya dlya kompozitsionnogo nikelirovaniya i khromirovaniya* [Plasma-metallurgical production of silicon carbide for composite nickel plating and chrome plating]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 188 p.
12. Kuvshinov G.G., Mogilnykh Yu.I., Kuvshinov D.G., Yermakov D.Yu., Yermakova M.A., Salanov A.N., Rudina N.A. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition. *Carbon*, 1999, vol. 37, pp. 1239–1246.
13. Samsonov G.V., ed. *Fiziko-khimicheskie svoystva okislov* [Physico-chemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 472 p.
14. Blott S.J., Pye K. Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, vol. 26, pp. 1237–1248.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Квашина Татьяна Сергеевна – родилась в 1994 году, магистрант кафедры химии и химической технологии Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – синтез тугоплавких соединений. Имеет более 5 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: k.tatiana3105@gmail.com).

Kvashina Tatyana Sergeevna (b. 1994) – a Master's degree student at the department of chemistry and chemical technology, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on the synthesis of refractory compounds. She is the author of more than 5 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: k.tatiana3105@gmail.com)



Крутский Юрий Леонидович – родился в 1952 году, канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – синтез тугоплавких соединений. Имеет более 20 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: krutskii@yandex.ru).

Krutskii Yurii Leonidovich (b. 1952) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of chemistry and chemical technology, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the synthesis of refractory compounds. He is the author of more than 20 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: krutskii@yandex.ru)



Черкасова Нина Юрьевна – родилась в 1990 году, аспирант кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Имеет более 15 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ninacherkasova60@gmail.com)

Cherkasova Nina Yuryevna (b. 1990) – a PhD student at the department of materials science in mechanical engineering, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on obtaining high-strength ceramics. She is the author of more than 15 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ninacherkasova60@gmail.com)



Кузьмин Руслан Изатович – родился в 1992 году, аспирант кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Имеет более 15 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kuzmin.2010@corp.nstu.ru)

Kuzmin Ruslan Izatovich (b. 1992) – a PhD student at the department of materials science in mechanical engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on obtaining high-strength ceramics. He is the author of more than 15 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kuzmin.2010@corp.nstu.ru)



Тюрин Андрей Геннадьевич – родился в 1978 году, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – поверхностное упрочнение металлических материалов, высокоэнергетическая обработка материалов, твердые сплавы. Имеет более 20 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: tyurin78@mail.ru).

Tyurin Andrey Gennadievich (b. 1978) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of materials science in mechanical engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on surface hardening of metallic materials, high-energy materials processing, and hard alloys. He is the author more than 20 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: tyurin78@mail.ru)

Статья поступила 10 декабря 2017 г.
Received December 10, 2017

To Reference:

Kvashina T.S., Krutskii Yu.L., Cherkasova N.Yu., Kuzmin R.I., Tyurin A.G. Sintez vysokodispersnogo karbida kremniya iz raznykh shikhtovykh materialov [Synthesis of highly dispersed silicon carbide from various charge materials]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 4 (37), pp. 80–90. doi: 10.17212/1727-2769-2017-4-80-90