ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 2. С. 145 – 150. © 2017. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В.

УДК 621.921.26

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ – ПРОДУКТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА БУРОУГОЛЬНЫМ ПОЛУКОКСОМ*

Aникин A.E., к.т.н., доиент кафедры теплоэнергетики и экологии (kafcmet@sibsiu.ru) Галевский Г.В., д.т.н., профессор, директор института металлургии и материаловедения, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии (kafcmet@sibsiu.ru) **Руднева В.В.,** д.т.н., профессор кафедры металлургии иветных металлов *и химической технологии* (kafcmet@sibsiu.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Проведена физико-химическая аттестация карбида кремния, полученного из высокодисперсной шихты двух видов, состоящей из микрокремнезема, образующегося при производстве кремния и высококремнистого ферросилиция, и полукокса из бурого угля Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна. Микрокремнезем обоих видов содержит 93,41 - 95,33 % и 91,72 - 93,63 % SiO,; 1,96 - 3,28 % 2 и 0,56 – 1,18 % 2 С 2 с 2 о,30 – 0,34 % и 0,18 – 0,20 % 2 Si 2 с 2 с 2 (CaO + Fe 2 O $_{3}$ + MnO). Микрокремнезем имеет удельности ную поверхность 21 000 – 24 000 м²/кг, склонен к агрегированию с образованием шаровидных агрегатов размером 200 – 800 нм. Агрегаты составлены шарообразными частицами размерного диапазона от 30 до 100 нм. Буроугольный полукокс содержит 94,05 % углерода; 9,2 % золы; 0,2 % серы; 0,007 % фосфора и имеет удельную поверхность 264 000 кг/м². Исследованы фазовый и химический составы карбида кремния, его удельная поверхность, размер и форма карбидных частиц. Установлено, что в обоих случаях преобладающей фазой является карбид кремния кубической структуры (β-SiC), а сопутствующей – стекловидная фаза, образованная силикатами кальция, магния и железа. При карбидизации шихты, содержащей микрокремнезем производства ферросилиция, карбиду кремния сопутствует а-железо. При температуре синтеза 1923 и 1973 К и продолжительности синтеза 50 и 90 мин происходит полиморфное превращение β-SiC в α-SiC₁₁. Содержание карбида кремния в продуктах карбидизации составляет 82,52 – 84,90 %. Установлены целесообразность и оптимальные условия химического обогащения карбида кремния: воздействие соляной кислотой концентрации не менее 35 % при температуре 353 К, отношении Т:Ж = 1:2, длительности 3 ч. Определены показатели химического обогащения: содержание карбида кремния в продуктах обогащения 90,42 - 91,10 %, удаление примесей оксидов металлов и железа на 87 - 95 %. Карбид кремния представляет собой микропорошок с частицами неправильной формы размерного диапазона 0,2 – 1,0 мкм с удельной поверхностью $8000 - 9000 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Ключевые слова: карбид кремния, микропорошок, микрокремнезем, буроугольный полукокс, карбидизация, химическое обогащение, фазовый и химический составы, размер и морфология частиц.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-145-150

В России в течение нескольких десятилетий сложилась практика достаточно широкого применения в металлургическом, огнеупорном и керамическом производствах карбидокремниевых шлифовальных материалов абразивного назначения [1, 2]. Однако в настоящее время такой подход не соответствует принципам ресурсо- и энергосбережения, что предопределяет поиск перспективных материалов и технических решений для разработки и освоения технологических вариантов производства так называемого безразмольного микропорошка карбида кремния с реализацией их в непрерывном режиме [3 – 7]. Технологическая целесообразность такого подхода обоснована и подтверждена ранее [8 - 10].

Целью настоящей работы является проведение физико-химической аттестации карбида кремния, полу-

ченного из высокодисперсной шихты, состоящей из техногенного микрокремнезема и буроугольного полукокса.

Исследовался карбид кремния, полученный при термической обработке при температуре 1923 – 1973 К в течение 20 – 25 мин брикетированной шихты двух видов: из микрокремнезема, образующегося при производстве кремния (МК-Кр) и высококремнистого ферросилиция (МК-ФС) и содержащего соответственно 93,92 и 93,00 % диоксида кремния с удельной поверхностью $25\ 000\ {\rm m}^2/{\rm kr}$ [11, 12]. В качестве восстановителя в шихту вводится полукокс бурого угля Березовского месторождения (БПК), содержащий 81,9 % углерода; 8,6 % золы с удельной поверхностью 260 000 м²/кг [13, 14]. Условия получения и свойства буроугольного полукокса описаны в работах [15, 16]. В обоих случаях использовалась шихта стехиометрического для получения карбида состава. При заданных составе шихты и темпе-

^{*} Работа выполнена в СибГИУ в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.1531.2014/К.

ратурно-временных условиях выход карбида кремния составляет 97,00 - 97,62 % при содержании его в продуктах карбидизации 82,52 - 84,90 %.

Физико-химическая аттестация карбида кремния включает определение его фазового и химического составов, удельной поверхности, размера и морфологии частиц. Для определения фазового состава образцов использовался стандартный рентгеновский дифрактометр общего назначения ДРОН-3 (излучение K_{\perp} меди, напряжение 36 кВ, сила тока 14 мкА). Химический состав карбида кремния определялся по стандартным методикам. Удельная поверхность рассчитываласьлась методом БЭТ по адсорбции аргона при температуре кипения жидкого азота на «тренированных» в инертной среде при 400 °C для удаления сорбированной влаги и газов образцах. Форма и размер карбидных частиц определялись методами электронной микроскопии, для чего использовались просвечивающий электронный микроскоп EF/4-M/P «Karl Zeis» с ускоряющим напряжением 65 кВт и растровый электронный микроскоп JSM-6700F с ускоряющим напряжением 0.5 - 30.0 кВ и разрешением 0,1 нм при 15 кВ и 0,22 нм при 1 кВ.

Результаты исследования фазового состава карбида кремния представлены в табл. 1. На рис. 1 приведены рентгенограммы карбида кремния — продукта термической обработки шихты МК-Кр-БПК при температуре 1973 К и длительности 30, 50, 90 мин. Установлено, что в обоих случаях к 10 минуте преобладающей фа-

зой является карбид кремния кубической структуры (β-SiC). При карбидизации шихты МК-ФС-БПК ему сопутствует α-железо. Во всех исследованных образцах также присутствует стекловидная фаза, образованная, по-видимому, силикатами кальция, магния и железа. На рентгенограмме, представленной на рис. 1, а, положение дифракционных максимумов в 0,251; 0,217; 0,154; 0,131 нм и их интенсивности (1,00; 0,20; 0,60; 0,50) соответствуют карбиду кремния кубической модификации (β-SiC) и подтверждают преимущественное образование его в виде этой модификации. При увеличении длительности термической обработки шихты с 30 до 50 и 90 мин на рентгенограммах продуктов (рис. $1, \delta, \epsilon$) появляются основные рефлексы α -SiC_{II} (0,262; 0,235; 0,200; 0,167; 0,141 нм). Значительное увеличение и появление рефлексов α -SiC_{II} (0,262; 0,235; 0,167; 0,141 нм) подтверждает повышение содержания этого политипа в синтезированном карбиде кремния. На рентгенограмме, представленной на рис. 1, в, присутствуют все рефлексы α -SiC, и β -SiC, что хорошо согласуется с приведенными в работе [17] данными о политипном составе технического карбида кремния. Это полиморфное превращение в подобных температурно-временных условиях характерно и для карбида кремния – продукта карбидизации шихты МК-ФС-БПК.

В настоящее время жесткие требования со стороны потребителей обусловливают, по крайней мере, двухстадийность всех известных технологий производства

Таблица 1

Фазовый состав карбида кремния

Table 1. Phase composition of silicon carbide

Длительность	Фазовый соста	Площадь дифракционного		
термической обработки шихты, мин	шихта МК-Кр-БПК	шихта МК-ФС-БПК	максимума $d/n = 0,251$ нм, мм ²	
	MIK-KP-BIIK	MK-ΦC-BHK		
5	β -кристобалит, β-SiC	β-кристобалит, β-SiC, α-Fe	112 116	88 87
10	β-SiC	β-SiC β-SiC, α-Fe		312 202
15	β-SiC	β-SiC, α-Fe	317 242	344 234
20	β-SiC	β-SiC, α-Fe	340 254	342 242
25	β-SiC	β-SiC, α-Fe	356 271	353 242
30	β-SiC	β-SiC, α-Fe	374 282	355 257
50	β-SiC, α-SiC	β-SiC, α-SiC, α-Fe	369 313	377 302
90	α-SiC, β-SiC	α-SiC, β-SiC, α-Fe	317 289	303 291

 Π р и м е ч а н и е. В числителе – при T = 1923 K, в знаменателе – при T = 1973 K

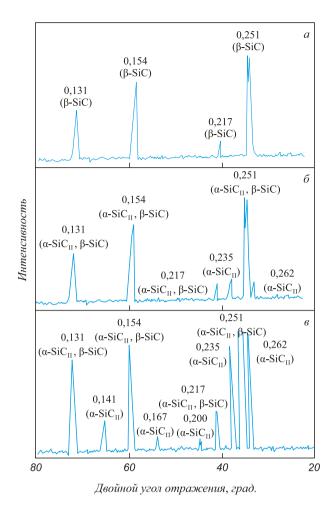


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм карбида кремния — продукта термообработки шихты МК-Кр-БПК при температуре 1973 К и длительности 30 (a), 50 (6) и 90 (6) мин

Fig. 1. Fragments of X-ray diffraction patterns of silicon carbide – the product of heat treatment of MK-Kr-BPK charge at the temperature of 1973 K and the durability of 30 (a), 50 (b) and 90 (c) min

карбида кремния, включающего получение и рафинирование, причем рафинирование зачастую предполагает сочетание гидро- и пирометаллургических операций. Реализуемая традиционная технология производства карбидокремниевых шлифматериалов абразивного назначения включает их обогащение магнитной сепарацией для удаления примесей железа, накопленных в процессе измельчения карбида кремния, и химическое обогащение [18 – 20].

Химическое обогащение основано на способности сопутствующих примесей растворяться в агрессивных средах и переходить в раствор агрессивного компонента, изменяя таким образом минеральный состав обогащаемого исходного материала. Химическим обогащением извлекаются поверхностные примеси шлифматериалов и примеси, не извлекаемые магнитной сепарацией. К таким примесям относятся пленки оксида железа и наклеп железа от аппаратуры в процессе измельчения абразива, а также примеси кремния и его диоксида. Химическое обогащение обычно проводится

в две стадии и включает последовательное щелочное и кислотное обогащение. В процессе щелочного обогащения в раствор переходят кремний и его диоксид, реагируя со щелочью:

$$Si + 2NaOH \rightarrow Na_2O \cdot SiO_2 + H_2;$$
 (1)

$$SiO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2O \cdot SiO_2 + H_2O.$$
 (2)

Кислотное обогащение проводится 10 %-ным раствором серной кислоты или смесью 2-х и 3-х %-ных растворов серной и плавиковой кислот.

Учитывая состав и свойства примесей, вносимых в карбид микрокремнеземом и золой БПК, представляется целесообразным проведение кислотной обработки раствором соляной кислоты, с помощью которой примеси металлов и оксидов могут быть переведены в растворимое соединение по следующим реакциям:

$$2Fe + 6HCl = 2FeCl_3 + 3H_2;$$
 (3)

$$Fe_2O_3 + 6HCl = 2FeCl_3 + 3H_2O;$$
 (4)

$$2Al_2O_3 + 6HCl = 2AlCl_3 + 3H_2O;$$
 (5)

$$MgO + 2HCl = MgCl2 + H2O; (6)$$

$$CaO + 2HCl = CaCl2 + H2O. (7)$$

С учетом такого подхода разработана и реализована следующая одностадийная схема химического обогащения карбида кремния: обработка его раствором соляной кислоты концентрацией не ниже 35 % при температуре 353 К и плотности пульпы (Т:Ж) 1:2 в течение трех часов; фильтрование для удаления маточного кислотного раствора; промывка горячей водой для удаления продуктов реакций и остатков кислоты; сушка карбида при температуре 383 К. Изменение химического состава карбида кремния в результате обогащения приведено в табл. 2.

Можно видеть, что в результате химического обогащения содержание SiC в карбиде превышает 90 %, т.е. достигается уровень, регламентированный для абразивных микропорошков зернистостью 1-2 мкм [1]. Эффективность обогащения от примесей оксидов металлов и железа достаточно высока и составляет 87-95 %. Для карбида кремния характерно повышенное содержание кремнезема — более 7 %, что позволяет рассматривать его как перспективный материал для производства карбидокремниевых огнеупоров на кремнеземной связке, содержащих обычно 84-89 % SiC, 6-12 % SiO₂.

Микрофотографии обогащенного карбида кремния приведены на рис. 2, I и 2, II. В обоих случаях карбид кремния получен в виде микропорошка с частицами неправильной формы размерного диапазона 0,2-1,0 мкм с удельной поверхностью 8000-9000 м 2 /кг.

Таблипа 2

Изменение химического состава карбида кремния при обогащении

Table 2. Change of the chemical composition of silicon carbide at enrichment

Карбид кремния и примеси	Содержание, %, при карбидизации шихты							
	МК-ФС-БПК			МК-Кр-БПК				
	Исход.	Обогащ.	% удаления	Исход.	Обогащ.	% удаления		
SiC	82,5	90,63	_	84,90	91,10	_		
Al_2O_3	1,25	0,19	85,0	1,07	0,14	87,0		
CaO	5,30	0,42	92,0	5,00	0,45	91,0		
MgO	2,48	0,15	94,0	0,54	0,03	95,0		
Fe	2,05	0,10	95,5	1,52	0,10	94,0		
SiO ₂	6,00	7,83	_	6,01	7,11	_		
Ссвоб	0,40	0,52	_	0,72	0,80	_		
Si _{cBoб}	0,10	0,16	_	0,24	0,27	_		

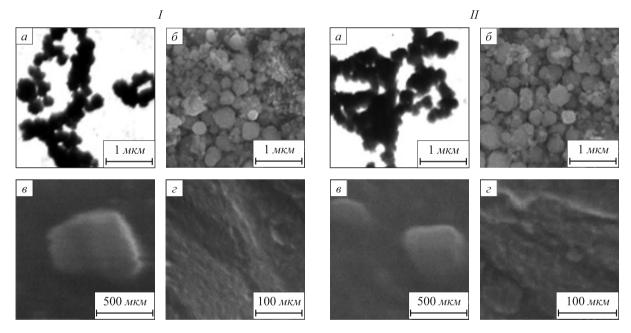


Рис. 2. Микрофотографии карбида кремния: I- шихта МК-ФС-БПК, II- шихта МК-Кр-БПК; a и $\delta-$ ансамбль частиц (ПЭМ и РЭМ); s и e- отдельная частица и микрорельеф ее поверхности (РЭМ)

Fig. 2. Microphotographs of silicon carbide: I –MK-FS-BPK charge, II –MK-Kr-BPK charge; a and δ – ensemble of particles (TEM and SEM); a and a – independent particle and microrelief of its surface (SEM)

Выводы. Исследованы фазовый и химический составы карбида кремния, его удельная поверхность, размер и форма карбидных частиц. Установлено, что карбид кремния имеет кубическую структуру (β -SiC) и содержит 82,52-84,90% основной фазы, после химического обогащения -90,42-91,10% и представляет микропорошок с частицами неправильной формы размерного диапазона 0,2-1,0 мкм с удельной поверхностью 8000-9000 м²/кг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- I. Гаршин А.П., Шумячер В.М., Пушкарев О.И. Абразивы и материалы конструкционного назначения на основе карбида кремния. Волгоград: изд-во ВолгГАСУ, 2008. 189 с.
- Гаршин А.П. Керамика для машиностроения. М.: Моснаучтехлитиздат. 2003. – 384 с.
- 3. Moshtaghioun B.M., Poyato R., Cumbrera F.L., de Bernardi-Martin S., Monshi A., Abbasi M.H. Rapid carbothermic synthesis of silicon carbide nano powders by using microwave heating // Journal of the European Ceramic Society. 2012. Vol. 32. No. 8. P. 1787–1794.

- Evans R.S., Bourell D.L., Beaman J.J., Campbell M.I. Rapid manufacturing of silicon carbide composites // Rapid Prototyping Journal. 2005. Vol. 11. No. 1. P.37 – 40.
- Shi L., Zhao H., Yan Y., Li Z., Tang Ch. Synthesis and characterization of submicron silicon carbide powders with silicon and phenolic resin // Powder Technology. 2006. Vol. 169. No. 2. P. 71–76.
- Dhanaraj G., Raghothamachar B., Dudley M. Growth and Characterization of Silicon Carbide Crystals // Springer Handbook of Crystal Growth. 2010. P. 797 820
- Willander M., Friesel M., Wahab Q., Straumal B. Silicon carbide and diamond for high temperature device applications // Journal of Materials Science. 2006. Vol. 24. No. 3. P. 816 – 830.
- 8. Галевский Г.В., Протопопов Е.В., Темлянцев М.В. Использование техногенных металлургических отходов в технологии карбида кремния // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 4. С. 103 110.
- Полях О.А., Руднева В.В., Якушевич Н.Ф. и др. Применение техногенных отходов металлургических предприятий для производства карбида кремния // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 8. С. 5 – 12.
- Lee H. High-temperature strength of silicon carbide ceramics sintered with rare-earth oxide and aluminum nitride // Acta Materialia. 2007. 55[2]. P. 727 – 736.
- 11. ТУ 5743 048 02495332 96. Микрокремнезем конденсированный. Введ. 01.08.1995. M. 1996.
- ТУ 14 142 17 01. Микрокремнезем уплотненный огнеупорный. Введ. 01.06.2001. – Новокузнецк. 2001.
- 13. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. Металлизация оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства. В кн.: XIV Международный конгресс

- сталеплавильщиков и производителей металла: сб. трудов / Москва Электросталь : МГОО «Ассоциация сталеплавильщиков», 2016. С. 608-614.
- 14. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. Применение буроугольных полукоксов в металлургии: технологическая и экономическая оценка // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 2 (243). С. 114 123.
- Страхов В.М. Научные и производственные аспекты получения специальных видов кокса для электротермических производств // Кокс и химия. 2008. № 9. С. 44 – 49.
- 16. Страхов В.М. Проблемы с углеродными материалами для рудной и химической электротермии и пути их решения // Кокс и химия. 2010. № 8. С. 29 33.
- Abderrazak H., Selmane Bel Hadj Hmida E. Silicon Carbide: Synthesis and Properties // Book edited by Rosario Gerhardt. 2011.
 Vol. 4. P. 1211-1226.
- Fu Q.-G., Li H.-J., Shi X.-H., Li K.-Zh., Sun G.-D. Silicon carbide coating to protect carbon/carbon composites against oxidation // Scripta Materialia. 2005. Vol. 52. No. 9. P. 923–927.
- Rezaie1 A., Fahrenholtz W.G., Hilmas G.E. Evolution of structure during the oxidation of zirconium diboride–silicon carbide in air up to 1500 °C // Journal of the European Ceramic Society. 2007. Vol. 27. No. 6. P. 2495–2501.
- Ohtani N., Katsuno M., Nakabayachi M., Fujimoto T., Tsuge H., Yaschiro H., Aigo T., Hirano H., Hoshino T., Tatsumi K. Investigation of heavily nitrogen-doped n+4H-SiC crystals grown by physical vapor transport // Journal of Crystal Growth. 2009. Vol. 6. P. 1475 – 1481.

Поступила 18 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 2, pp. 145-150.

PHYSICAL-CHEMICAL ASSESSMENT OF SILICON CARBIDE – PRODUCT OF TECHNOGENIC SILICA RECOVERY BY FUME LIGNITE SEMI-COKE

A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva

Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

Abstract. The paper describes the conducted physical-chemical certification of silicone carbide, obtained from fine-grained charge of two kinds, which contains microsilica formed at the production of silicon and high-silicon ferrosilicium, as well as semicoke from brown coal of Beresovskii deposit of Kansk-Achinsk basin. Microsilca of both kinds contains 93.41-95.33~% and 91.72-93.00~%, 63~%of $\mathrm{SiO}_2;~1.96-3.28~\%$ and 0.56-1.18~% of $\mathrm{C}_{_{\mathrm{CB06.}}};~0.30-0.34~\%$ and 0.18-0.20% of Si_{cBoO.}; 1.25-1.45% and 1.38-2.32% of (CaO+Fe₂O₃ + MnO). Microsilica has a specific surface of 21 000 - 24 000 m²/kg and is inclined to aggregation with the formation of spherical units with the size of 200 - 800 nm. The units consist of spherical particles with a dimensional diapason from 30 to 100 nm. Brown-coal semicoke contains 94.05 % of carbon; 9.2 % of ash; 0.2 % of sulfur; 0.007 % of phosphorus and has a specific surface of 264 000 kg/m². Phase and chemical compositions of silicone carbide, its specific surface, the size and the form of carbide particles have been studied. It has been established that in both cases predominate phase is silicon carbide of a cubical structure (β -SiC), but an accompanied one is a glassy phase, formed with lime silicate, magnesium and iron. At carburizing of charge, containing microsilea of the production of ferrosilicium, α-iron accompanies to silicon carbide. At the synthesis temperature of 1923 and 1973 K and the duration of 50 and 90 minutes polymorthic transformation of β -SiC into α -SiC, occurs. The content of silicon carbide in the products of carbonization is 82,52 – 84,90 %. The authors of the work have established the viability and optimal conditions of chemical enrichment of silicon carbide: influence of hydrochloric acid with the concentration of not less than 35 % at the temperature of 353 K, ratio of T: $\mathbb{K}=1:2$, durability of 3 hours. The indexes of chemical enrichment have been defined: the content of silicon carbide in the products of enrichment is 90.42 – 91.10 %, removal of impurities of metal and iron oxides of 87 – 95 %. Silicon carbide appears as micropowder with the particles of wrong form with the dimensional range of 0.2-1.0 um with the specific surface of $8000-9000~\text{m}^2/\text{kg}$.

Keywords: silicon carbide, micropowder, microsilica, brown-coal semicoke, carbonization, chemical enrichment, phase and chemical compositions, size and morphology of a particle.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-145-150

REFERENCES

- Garshin A.P., Shumyacher V.M., Pushkarev O.I. Abrazivy i materialy konstruktsionnogo naznacheniya na osnove karbida kremniya [Abrasives and materials of constructional use based on silicon carbide]. Volgograd: VolgGASU, 2008, 189 p. (In Russ.).
- Garshin A.P. Keramika dlya mashinostroeniya [Ceramics for machine-building industry]. Moscow: Mosnauchtekhlitizdat, 2003, 384 p. (In Russ.).
- Moshtaghioun B.M., Poyato R., Cumbrera F.L., de Bernardi-Martin S., Monshi A., Abbasi M.H. Rapid carbothermic synthesis of silicon carbide nano powders by using microwave heating. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012, vol. 32, no. 8, pp. 1787–1794.
- Evans R.S., Bourell D.L., Beaman J.J., Campbell M.I. Rapid manufacturing of silicon carbide composites. *Rapid Prototyping Journal*. 2005, vol. 11, no. 1, pp. 37–40.

- Shi L., Zhao H., Yan Y., Li Z., Tang Ch. Synthesis and characterization of submicron silicon carbide powders with silicon and phenolic resin. *Powder Technology*. 2006, vol. 169, no. 2, pp. 71–76.
- Dhanaraj G., Raghothamachar B., Dudley M. Growth and Characterization of Silicon Carbide Crystals. Springer Handbook of Crystal Growth. 2010, pp. 797–820.
- Willander M., Friesel M., Wahab Q., Straumal B. Silicon carbide and diamond for high temperature device applications. *Journal of Materials Science*. 2006, vol. 24, no. 3, pp. 816–830.
- Galevskii G.V., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V. Usage of technogenic metallurgical wastes in the technology of silicon carbide. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014, no. 4, pp. 103–110. (In Russ.).
- 9. Polyakh O.A., Rudneva V.V., Yakushevich N.F., Galevskii G.V., Anikin A.E. Application of technogenic waste of metallurgical plants for the production of silicon carbide. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2014, no. 8, pp. 5–12. (In Russ.).
- Lee H. High-temperature strength of silicon carbide ceramics sintered with rare-earth oxide and aluminum nitride. *Acta Materialia*. 2007, 55(2), pp. 727–736.
- TU 5743 048 02495332 96. Mikrokremnezem kondensirovannyi. Vved. 01.08.1995 [TU 5743 048 02495332 96. Condensed microsilica. Introduced 01.08.1995]. Moscow, 1996. (In Russ.).
- TU 14 142 17 01. Mikrokremnezem uplotnennyi ogneupornyi. Vved. 01.06.2001 [TU 14 – 142 – 17 – 01. Compacted fire-proofed microsilica. Introduceed 01.06.2001]. Novokuznetsk, 2001. (In Russ.).
- 13. Anikin A.E., Galevskii G.V., Rudneva V.V., Galevskii S.G. Metallization of oxide-iron-containing wastes of metallurgical production. In: XIV Mezhdunarodnyi kongress staleplavil shchikov i proizvoditelei metalla: sb. trudov [14th Int. congress of steelmakers and metal producers: Coll. papers]. Moscow Elektrostal': MGOO "Assotsiatsiya staleplavil'shchikov", 2016, pp. 608–614. (In Russ.).
- 14. Anikin A.E., Galevskii G.V., Rudneva V.V., Galevskii S.G. Usage of brown-coal semicoke in metallurgy: technological and economical assessment. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta.* 2016, no. 2 (243), pp. 114–123. (In Russ.).

- **15.** Strakhov V.M. Scientific and industrial aspects of receiving special kinds of coke for electro-thermal production. *Koks i khimiya*. 2008, no. 9, pp. 44–49. (In Russ.).
- Strakhov V.M. Problems with carbon materials in ore and chemical electrofurnaces. *Coke and Chemistry*. 2010, vol. 53, no. 8, pp. 301–304.
- Abderrazak H., Selmane Bel Hadj Hmida E. Silicon carbide: synthesis and properties. *Book edited by Rosario Gerhardt*. 2011, vol. 4, pp. 1211–1226.
- **18.** Fu Q.-G., Li H.-J., Shi X.-H., Li K.-Zh., Sun G.-D. Silicon carbide coating to protect carbon/carbon composites against oxidation. *Scripta Materialia*. 2005, vol. 52, no. 9, pp. 923–927.
- **19.** Rezaiel A., Fahrenholtz W.G., Hilmas G.E. Evolution of structure during the oxidation of zirconium diboride–silicon carbide in air up to 1500 °C. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007, vol. 27, no. 6, pp. 2495–2501.
- Ohtani N., Katsuno M., Nakabayachi M., Fujimoto T., Tsuge H., Yaschiro H., Aigo T., Hirano H., Hoshino T., Tatsumi K. Investigation of heavily nitrogen-doped n+ 4H-SiC crystals grown by physical vapor transport. *Journal of Crystal Growth*. 2009, vol. 6, pp. 1475–1481.
- Acknowledgements. The work was performed in SibSIU within the project part of the state task of the Russian Ministry of Education and Science no. 11.1531.2014/K.

Information about the authors:

- A.E. Anikin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (kafcmet@sibsiu.ru)
- G.V. Galevskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Non-ferrous Metallurgy and Chemical Engineering", Director of the Institute of Metallurgy and Materials (kafcmet@sibsiu.ru)
- V.V. Rudneva, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Non-ferrous Metallurgy and Chemical Engineering" (Kafcmet@sibsiu.ru)

Received 18 February, 2015