

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.762:621.904

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-407-415>

Поступила в редакцию 03.05.2018

Received 03.05.2018

Е. В. Звонарев, А. Ф. Ильющенко, Ж. А. Витко, В. А. Осипов, Д. В. Бабура*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Беларусь*

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования структуры, фазового состава и физико-механических свойств реакционно-спеченной керамики на основе карбида кремния и бора, полученной реакционным спеканием. Показано, что свойства реакционно-спеченной керамики на основе карбидов во многом определяются качеством пропитки пористого карбидного каркаса кремнием, которая, в свою очередь, зависит от общей и открытой пористости, формы и размера пор прессовки, состава шихты из порошка карбида. Высокотемпературное спекание, сопровождающееся пропиткой карбидного каркаса кремнием и взаимодействием его с углеродной составляющей каркаса, во многом определяет свойства материала. Главной задачей в реализации этого процесса является создание условий, обеспечивающих полное заполнение пор в исходной прессовке в процессе пропитки расплавом кремния и максимальной активации процесса химического взаимодействия между расплавом кремния, углеродом и другими компонентами, входящими в состав шихты. Проведен комплекс исследований по изучению влияния давления прессования и температуры отжига шихты на основе порошков карбида кремния и бора с добавкой графита на поровую структуру прессовки и качество ее пропитки расплавом кремния. Показано, что плотность, прочность при изгибе, твердость керамики на основе карбида кремния и карбида бора, получаемой реакционным спеканием, повышаются с ростом давления прессования карбидных каркасов. Оптимальной пористостью карбидного каркаса является 25–30 %, размер пор – 1,0–1,5 мкм. Показано, что керамика на основе карбида бора и карбида бора с 50 % карбида кремния, пропитанная кремнием при высокотемпературном спекании, обладает более высокими значениями прочности и твердости, чем на основе карбида кремния, благодаря более высокой адгезионной прочности на границе раздела частиц карбида бора и связки, которая вызвана растворением карбида бора в расплаве кремния и образованием на поверхности частиц сложного карбида.

Ключевые слова: карбид кремния, карбид бора, реакционно-спеченная керамика, кремний, пропитка пористого каркаса, пористость, размер пор, температура отжига, давление прессования, плотность, прочность при изгибе, твердость

Для цитирования. Влияние режимов реакционного спекания на структуру и свойства карбидной керамики / Е. В. Звонарев [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 407–415. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-407-415>

E. V. Zvonarev, A. Ph. Ilyushchanka, Zh. A. Vitko, V. A. Osipov, D. V. Babura*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus*

EFFECT OF REACTION SINTERING MODES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBIDE CERAMICS

Abstract. Experimental studies of the structure, phase composition, physical and mechanical properties of the reaction-sintered ceramics based on silicon carbide and boron obtained by reaction sintering have been performed. It has been shown that the properties of the reaction-sintered ceramics based on carbides are largely determined by the quality of impregnation of the porous carbide frame with silicon, which depends on the total and open porosity, shape and size of the pores of the compact, the composition of the charge from the carbide powder. High-temperature sintering, followed by impregnation of the carbide frame with silicon and its interaction with the carbon constituent of the frame, largely determines the properties of the material. The main task in the implementation of this process is to create conditions that ensure the full filling of pores in the initial compact during impregnation with silicon melt and, secondly, maximum activation of chemical interaction between the melt of silicon, carbon and other components that compose the charge. A complex of studies on the effect of compacting pressure and annealing temperature of the charge based on silicon carbide and boron powders with the addition of graphite on the pore structure of the compact and the quality of its impregnation with a silicon melt has been carried out in this work. It has been shown that the density, bending strength, hardness of ceramics based on silicon carbide and boron carbide obtained by reaction sintering are increased with a rise in compacting pressure of carbide frames. The optimum porosity of the carbide frame is 25–30 %; the pore size is 1.0–1.5 μm. It has been also demonstrated that ceramics based on boron carbide and boron carbide with 50 % silicon carbide impregnated with silicon at high-temperature sintering has higher strength and hardness values than those based on silicon carbide due to higher adhesion

strength at the interface of boron carbide particles and binder, caused by the dissolution of boron carbide in the silicon melt and the formation of complex carbide particles on the surface.

Keywords: silicon carbide, boron carbide, reaction-sintered ceramics, silicon, impregnation of the porous frame, porosity, pore size, annealing temperature, compacting pressure, density, bending strength, hardness

For citation. Zvonarev E. V., Ilyushchanka A. Ph., Vitko Zh. A., Osipov V. A., Babura D. V. Effect of reaction sintering modes on the structure and properties of carbide ceramics. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryyya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 407–415 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-407-415>

Введение. Карбидная керамика на основе кремния и бора и других элементов весьма востребована в промышленности. Наибольшее применение карбидокремниевая керамика нашла в машиностроении, атомной энергетике, на предприятиях оборонной, металлургической, пищевой, химической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности благодаря ее уникальным свойствам (высокая теплостойкость, жаростойкость вплоть до 1500 °С, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, теплопроводность, химической инертность, низкий коэффициент термического расширения, биосовместимость, устойчивость к радиационным воздействиям) [1–3]. Среди областей ее применения можно выделить пары трения, сухие газодинамические уплотнения, радиальные подшипники скольжения, работающие в жестких условиях абразивных и химически активных сред при высоких температурах, нагревательные элементы, фильеры, распылительные сопла, термопарные чехлы, элементы конструкций роторных двигателей и двигателей с турбонаддувом и детали специального назначения.

Однако технология получения карбидокремниевых материалов весьма сложная и требует специального оборудования, так как частицы порошка карбида кремния вследствие особенностей строения очень неактивны при спекании. В настоящее время карбидокремниевую керамику получают в основном тремя способами: активированным спеканием, горячим прессованием, реакционным спеканием. Наиболее простым и менее затратным является метод реакционного спекания, который предполагает совмещение спекания с химической реакцией синтеза самого материала. При этом в шихту вводят углерод, а кремний поступает извне в процессе спекания. Источником кремния служит как твердый кремний, так и его пары. Технология получения карбидокремниевой керамики с использованием метода реакционного спекания является весьма сложной, состоящей из ряда операций, от параметров которых зависят физико-механические и теплофизические свойства полученного материала.

Целью работы явилось изучение влияния состава и процесса получения на структуру и свойства реакционно-спеченной карбидной керамики.

Методика и методы исследования. В качестве объекта исследования использовали карбидную керамику, получаемую из шихты следующих составов, мас. %:

состав 1 – 100 % SiC + 10 % C_T;

состав 2 – 50 % SiC + 10 % C_T + 50 % B₄C;

состав 3 – 100 % B₄C + 10 % C_T.

Для проведения исследований использовались порошки карбида кремния (ГОСТ 26327-84) и карбида бора (ГОСТ 5744-85) в состоянии поставки, для реакционного спекания (силицирования) – отходы пластин полупроводникового кремния.

Из шихты исходных порошков, приготовленной в смесителе типа «пьяная бочка», при давлении 5–10 МПа прессовали образцы диаметром 10 мм, высотой 12 мм для исследования плотности, размера пор, сырой прочности прессовок и прочности на сжатие спеченных образцов, фазового состава и структуры. Спрессованные образцы подвергались поэтапно низкотемпературному отжигу, высокотемпературному отжигу, а затем реакционному спеканию (силицированию) в вакуумной печи при температуре 1500–1650 °С.

Исследования размера пор, структуры, фазового состава и физико-механических свойств проводили в сертифицированном Испытательном центре Института порошковой металлургии им. академика О. В. Романа на анализаторе размера пор SA 3100 (США), металлографическом микроскопе «MeF-3» (Австрия), рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3», микротвердомере «Micro-met» (Австрия), универсальной испытательной машине «Tinius Olsen H150K-U» (Великобритания). Пористость образцов определяли гидростатическим методом по ГОСТ 2409-95.

Результаты исследования. Поскольку свойства реакционно-спеченной керамики на основе карбидов во многом определяются качеством пропитки пористого карбидного каркаса кремнием [2], которая, в свою очередь, зависит от пористости и размера пор прессовки из порошка карбида, нами был проведен комплекс исследований по изучению влияния давления прессования и температуры отжига шихты на основе порошков карбида кремния и бора с добавкой графита (C_T) на характеристики поровой структуры прессовки и качество ее пропитки расплавом кремния. Результаты исследований представлены на рис. 1, 2.

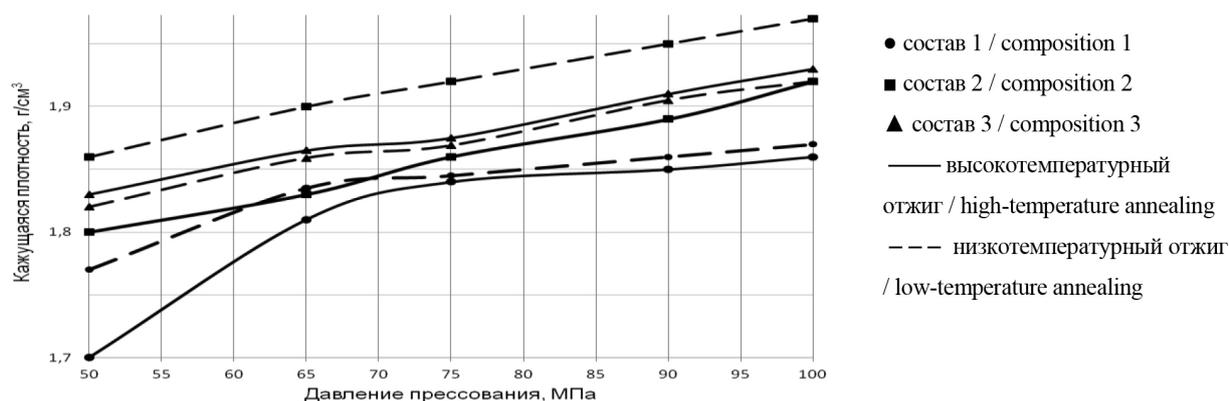


Рис. 1. Влияние давления прессования, температуры отжига и состава карбидной основы на кажущуюся плотность прессовок

Fig. 1. Influence of the compacting pressure, the annealing temperature and the carbide-based composition on the packed density of compacts

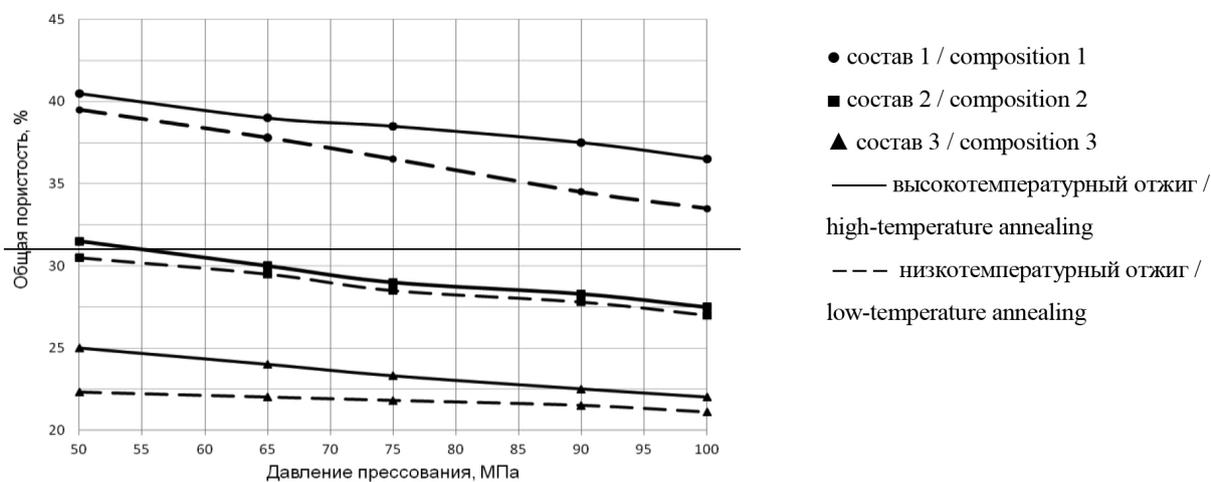


Рис. 2. Влияние давления прессования, температуры отжига и состава карбидной основы на общую пористость прессовок

Fig. 2. Influence of the compacting pressure, the annealing temperature and the carbide-based composition on the total porosity of compacts

Как видно из рис. 1 и 2, практически все полученные зависимости носят линейный характер, кроме материала на основе карбида кремния (кривая ●), в котором происходит резкое повышение кажущейся плотности при увеличении давления прессования от 5 до 7 МПа. Линейный характер зависимостей обусловлен уплотнением шихты только за счет переупаковки твердых частиц в массиве полимерного связующего, так как пластическая деформация карбидных частиц отсутствует [3].

Плотность всех составов практически одинакова и находится в пределах 1,77–1,92 г/см³ для шихты состава 1; 1,82, 1,92 г/см³ – для состава 2 и 1,86–1,97 г/см³ – для состава 3, пористость – 35–40 %, 27–31 % и 22,5–21,5 % соответственно. В целом прирост плотности в диапазоне давлений прессования 5–10 МПа составляет 0,10–0,12 г/см³, или 8–10 %. С повышением температуры отжига плотность прессовок снижается с 0,2 до 0,1 г/см³, пористость увеличивается на 2,0–3,5 % в зависимости от состава шихты. Наименьшей пористостью характеризуются прессовки из шихты на основе карбида бора, наибольшей – на основе карбида кремния. Снижение плотности с повышением температуры отжига обусловлено выгоранием углерода.

Поскольку скорость пропитки, как известно [4, 5], определяется прежде всего размером пор, изучали влияние давления прессования и температуры отжига на размер пор в исследуемых материалах. Установлено, что наибольшие размеры пор имеют прессовки из шихты состава 1 (10–14 мкм), наименьшие – состава 3 (1,7–5,0 мкм) (рис. 3). Размер пор в прессовках состава 2 равен 5,0–5,3 мкм. После высокотемпературного отжига прессовок размеры пор уменьшаются в среднем на 10–14 % и в прессовках состава 3 составляют 1,53–4,30 мкм.

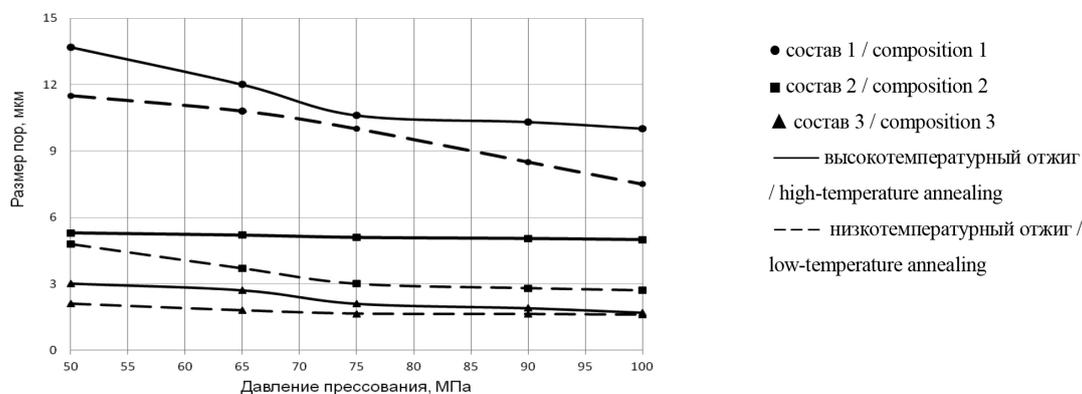


Рис. 3. Зависимость максимального размера пор в прессовках от давления прессования и температуры отжига
Fig. 3. Dependence of the maximum pore size in the compacts on the compacting pressure and the annealing temperature

Прочность прессовок, как было установлено нами при испытании на сжатие, зависит не только от плотности, но и от состава. Максимальной прочностью обладает материал состава 3 (рис. 4). Разрушение при испытании характеризуется двумя крайними состояниями: при низком давлении прессования образец разрушается по причине высокой остаточной пористости, а при высоком – происходит разрушение его целостности по причине большой упругой деформации частиц, при которой релаксация этих напряжений приводит к разрушению [6].

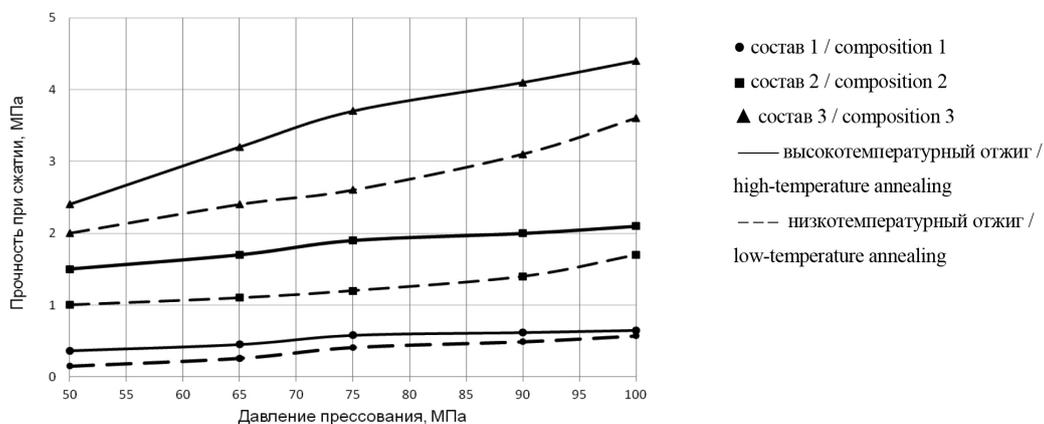


Рис. 4. Влияние давления прессования и температуры отжига на прочность прессовок исследуемых составов
Fig. 4. Influence of the compacting pressure and the annealing temperature on the strength of compacts of the investigated compositions

Повышение прочности прессовок состава 3 обусловлено, по-видимому, повышением адгезионной прочности на границе раздела карбидной фазы и материала связки за счет образования сложного карбида на поверхности исходных и перекристаллизованных зерен. Это происходит в результате химического взаимодействия частиц карбида бора и кремния, сопровождающегося разложением карбида бора на β -SiC и бор, который в свою очередь вступает во взаимодействие с кремнием, образуя силицид бора B_4Si , упрочняющего кремниевую связку.

Высокотемпературное спекание, которое сопровождается пропиткой карбидного каркаса кремнием и взаимодействием его с углеродной составляющей каркаса, во многом определяет свойства материала. Главной задачей в реализации этого процесса является создание условий, обеспечивающих полное заполнение пор в исходной прессовке в процессе пропитки расплавом кремния и максимальной активации процесса химического взаимодействия между расплавом кремния, углеродом и другими компонентами, входящими в состав шихты. Процесс пропитки контролируется целым рядом факторов, таких как пористость прессовки и размер пор, капиллярное давление, смачиваемость расплавом кремния карбидного каркаса и др.

Степень пропитки пористого карбидного каркаса расплавом кремния рассчитывали по формуле $\xi = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \cdot 100\%$, где m_1 – масса прессовки до пропитки, m_2 – масса прессовки после пропитки.

На рис. 5 представлена зависимость степени пропитки пористых прессовок исследуемых составов от давления прессования.

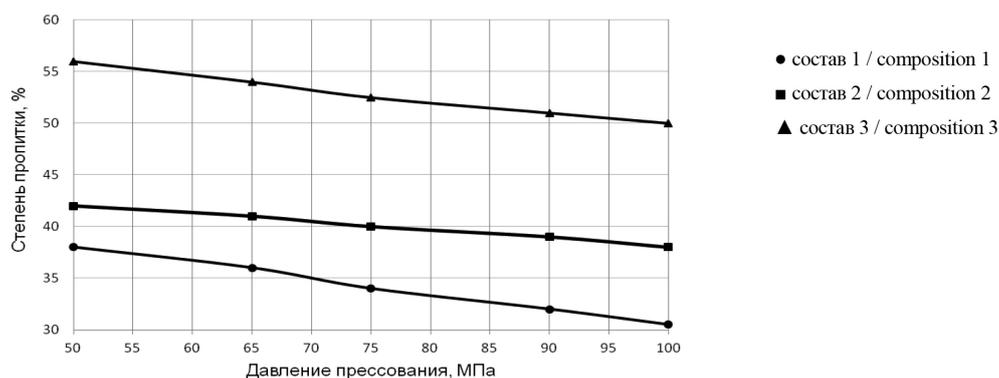


Рис. 5. Зависимость степени пропитки прессовок из карбидного каркаса от давления прессования

Fig. 5. Dependence of the impregnation degree of compacts made of the carbide frame on the compacting pressure

Максимальная степень пропитки достигается для состава 3, что объясняется меньшим диаметром пор в карбидной прессовке (см. рис. 3) и, соответственно, большим капиллярным давлением.

Необходимо отметить, что прочность исследуемых материалов хорошо коррелирует со степенью пропитки. Максимальной прочностью обладает керамика состава 3 (261 МПа), наименьшей – состава 1 (230 МПа) (рис. 6).

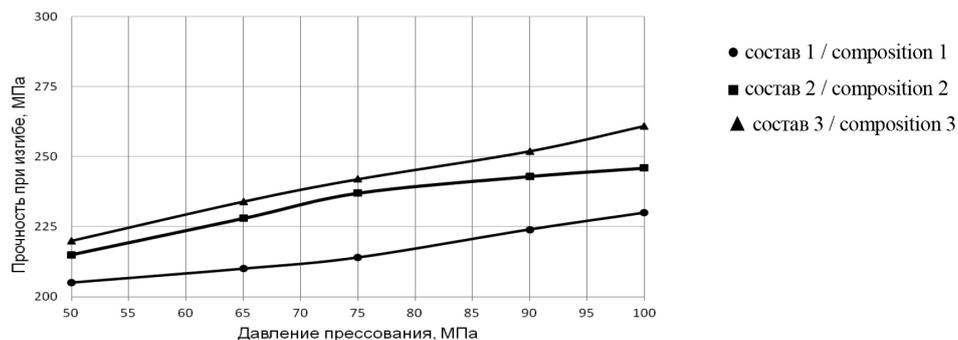


Рис. 6. Прочность исследуемых составов керамики

Fig. 6. Strength of the investigated compositions of ceramics

Полученные результаты свидетельствуют о том, что прочность и твердость карбидной керамики повышаются при увеличении плотности прессовок (табл. 1). Так, твердость керамики состава 3 составляет 91–92 HRA и HV 35–37 ГПа; состава 1 – 75–80 HRA и 25–27 ГПа соответственно. Это связано с тем, что при использовании более плотных прессовок в структуре больше первичного карбида и меньше свободного кремния.

Таблица 1. Свойства реакционно-спеченной керамики, полученной пропиткой расплавом кремния пористых прессовок

Table 1. The properties of reaction-sintered ceramics obtained by impregnating silicon melt of porous compacts

Номер состава Composition number	Давление прессования, МПа Compacting pressure, МПа	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Общая пористость, % Total porosity, %	Твердость, HRA Hardness, HRA	Микротвердость карбидной фазы, ГПа Microhardness of the carbide phase, GPa	Прочность при изгибе, МПа Bending strength, МПа
1	50	2,96	4,6	74–79	24–25	195–216
	75	3,02	3,5	75–79	23–25	214
	100	3,05	2,8	75–80	25–27	220–241
2	50	2,76	4,9	73–79	29–30	204–225
	75	2,82	1,4	74–79	28–31	238
	100	2,88	3,1	75–80	28–34	238–254
3	50	2,65	7,4	72–80	32–35	211–228
	75	2,71	6,1	76–82	31–33	247
	100	2,73	4,2	91–92	35–37	257–263

Микроструктура керамики на основе карбида кремния (рис. 7) и карбида бора (рис. 8) существенно различается.

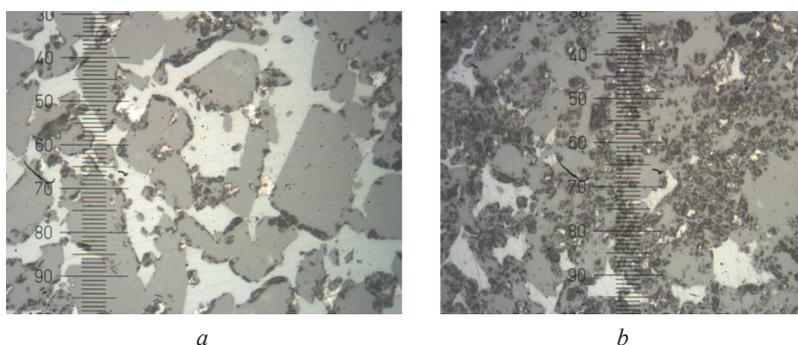


Рис. 7. Микроструктура образцов реакционно-спеченной керамики, полученной пропиткой кремнием пористых прессовок состава 1: *a* – давление прессования 50 МПа, *b* – давление прессования 100 МПа; $\times 500$

Fig. 7. Microstructure of samples of reaction-sintered ceramics obtained by impregnating silicon of porous compacts of composition 1: *a* – compacting pressure 50 MPa, *b* – compacting pressure 100 MPa; $\times 500$

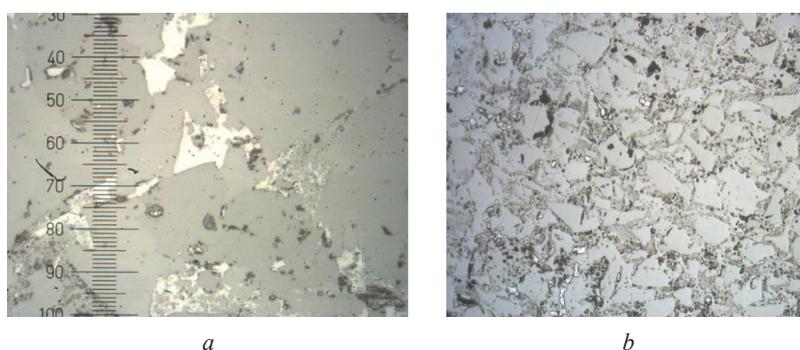


Рис. 8. Микроструктура реакционно-спеченной керамики, полученной пропиткой кремнием пористых прессовок состава 3: *a* – давление прессования 50 МПа, *b* – давление прессования 100 МПа; $\times 500$

Fig. 8. Microstructure of samples of reaction-sintered ceramics obtained by impregnating silicon of porous compacts of composition 3: *a* – compacting pressure 50 MPa, *b* – compacting pressure 100 MPa; $\times 500$

Структура керамики с каркасом, спрессованным при давлении 50 МПа, крупнозернистая, размеры частиц карбида кремния 20–80 мкм (рис. 7, *a*). Структура керамики с каркасом высокой плотности (давление прессования 100 МПа) плотная, состоящая из сросшихся частиц первичного и вторичного карбида кремния с микротвердостью 25–27 ГПа, полученного при взаимодействии кремния с углеродом каркаса (рис. 7, *b*). Участки свободного кремния располагаются дискретно.

Керамика, полученная на основе порошков карбида бора, отличается более совершенной структурой с четко выраженными границами карбидных частиц и связующего материала (рис. 8). Микротвердость карбидных частиц составляет 28–35 ГПа в керамике, спрессованной при давлении 50 МПа, и 25–27 ГПа – спрессованной при давлении 100 МПа. Микротвердость связки – 9–10 ГПа.

При формировании структуры керамики на основе карбида бора (состав 3) на границах раздела карбидной фазы и кремния в результате химического взаимодействия карбида бора с расплавом кремния образуется переходная зона состава $\text{SiC-B}_{4,6}\text{Si}$ с включениями мелких частиц B_4C (рис. 9, табл. 2) [7]. Этот эффект проявляется также в керамике состава 2, содержащей смесь порошков карбида бора и карбида кремния.

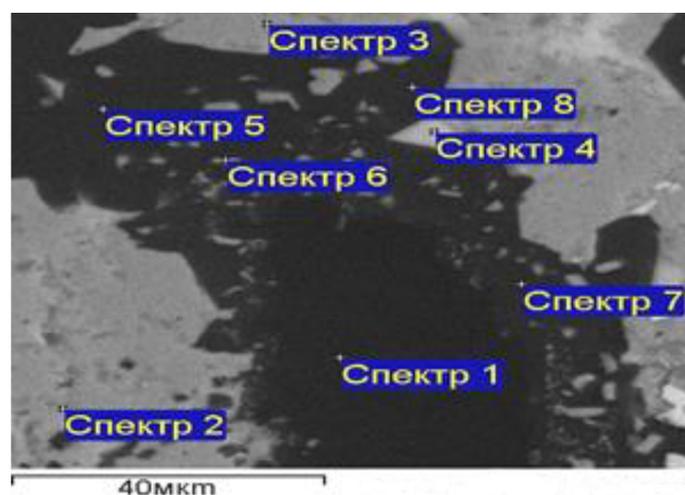


Рис. 9. Электронное изображение микроструктуры реакционно-спеченной керамики состава 3

Fig. 9. Electronic image of microstructure of reaction-sintered ceramics of composition 3

Таблица 2. Элементный состав реакционно-спеченной керамики состава 3

Table 2. Elemental composition of reaction-sintered ceramics of composition 3

Спектр Spectrum	B, %	C, %	Si, %
1	60,5	39,4	–
2	–	47,2	52,4
3	–	46,4	53,5
4	–	31,7	67,6
5	61,2	34,8	1,3
6	60,4	33,4	3,9
7	58,4	37,8	1,4

Рентгенофазовый анализ показал, что содержание карбидов в исследуемых материалах увеличивается с повышением давления прессования в среднем на 15 % (рис. 10, *a*, *b*), соответственно содержание свободного кремния уменьшается (рис. 10, *c*).

Наиболее высокое содержание карбидов ~80 % достигнуто на керамике составов 2 и 3, при этом содержание карбида кремния равно 70–75 %, карбида бора – 5–10 %, кремния – 20 %. Необходимо отметить, что в составах 2 и 3 после спекания наблюдается снижение содержания

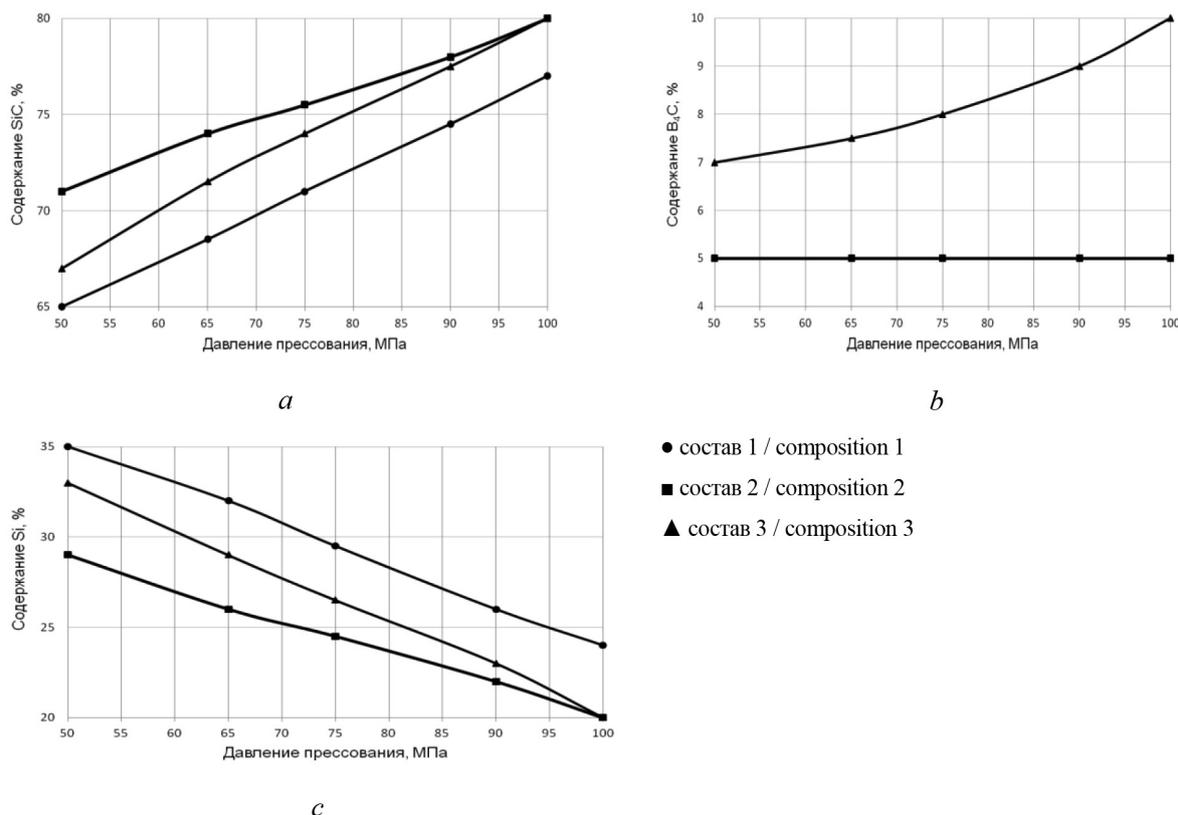


Рис. 10. Зависимость содержания карбидной фазы (a, b) и кремния (c) в исследуемых материалах
 Fig. 10. Dependence of the content of the carbide phase (a, b) and silicon (c) in the investigated materials

карбида бора. Так, в составе 2 содержание B_4C снизилось с 71–80 до 5 %, а в составе 3 – с 67–80 до 7–10 %. Это объясняется, по-видимому, распадом карбида бора и образованием карбида кремния при силицировании.

Заключение. Установлено, что свойства керамики на основе карбидов кремния и бора, полученной реакционным спеканием, существенно зависят как от состава шихты, так и параметров карбидных каркасов, пропитываемых кремнием (общей и открытой пористости, формы и размера пор), а также от степени их пропитки.

Показано, что плотность, прочность при изгибе, твердость керамики на основе карбида кремния и карбида бора, получаемой реакционным спеканием, повышаются с ростом давления прессования карбидных каркасов. Оптимальной пористостью карбидного каркаса является 25–30 %, размер пор – 1,0–1,5 мкм.

Установлено, что керамика на основе карбида бора и карбида кремния с 50 % карбида кремния, пропитанная кремнием при высокотемпературном спекании, обладает более высокими значениями прочности и твердости, чем на основе карбида кремния, благодаря более высокой адгезионной прочности на границе раздела частиц карбида бора и связи, вызванной растворением карбида бора в расплаве кремния и образованием на поверхности частиц B_4C сложного карбида $SiC/B_4C-B_4Si(B_6Si)-Si$.

Список использованных источников

1. Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин [и др.]. – М.: Научтехиздат, 2003. – 384 с.
2. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О. А. Агеев [и др.]. – Харьков: ИСМ, 2010. – 532 с.
3. Новая профилированная керамика на основе карбида кремния / К. Н. Филонов [и др.] // Изв. Рос. акад. наук. Сер. Физическая. – 2009. – Т. 73, № 10. – С. 1460–1462.
4. Washburn, E. W. The Dynamics of Capillary Flow / E. W. Washburn // Phys. Rev. – 1991. – Vol. 17, Iss. 3. – P. 273–283. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>

5. Влияние армирующих добавок и температуры силицирования на структуру и некоторые свойства реакционно-связанной керамики на основе карбида кремния / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: Беларус. навука, 2015. – Вып. 38. – С. 132–141.

6. Влияние технологических режимов получения на структуру и свойства реакционно-спеченной керамики на основе карбида кремния / Д. В. Бабуря [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: Беларус. навука, 2017. – Вып. 40. – С. 73–76.

7. Реакционно-связанная керамика состава $\text{SiC-B}_4\text{C-Si}$: получение и некоторые свойства / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Сборник докладов 9-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», Минск, 8–10 апр. 2015 г. – Минск: Беларус. навука, 2015. – Ч. 1. – С. 289–305.

References

1. Garshin A. P., Gropyanov V. M., Zaitsev G. P., Semenov S. S. *Ceramics for Machine Building Industry*. Moscow, Nauchtechizdat Publ., 2003. 384 p. (in Russian).

2. Ageev O. A., Beliaev A. E., Boltovets N. S., Kiselev V. S., Konakova R. V., Lebedev A. A., Milenin V. V., Okhrimenko O. B., Poliakov V. V., Svetlichnyi A. M., Cherednichenko D. I. *Silicon Carbide: Technology, Properties, Application*. Kharkov, Institute of Scintillation Materials, 2010. 532 p. (in Russian).

3. Filonov K. N., Kurlov V. N., Klassen N. V., Samoilov V. M., Vodovozov A. N. New shaped ceramics based on silicon carbide. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2009, vol. 73, no. 10, pp. 1377–1379. <https://doi.org/10.3103/S1062873809100165>

4. Washburn E. W. The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review*, 1991, vol. 17, iss. 3, pp. 273–283. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>

5. П'іушчэнко А. Ф., Осіпов В. А., Звонарев Е. В., Вітко Ж. А., Бабуря Д. В. Influence of reinforcing additives and the temperature of silicization on the structure and some properties of reactive-bonded ceramics based on silicon carbide. *Poroshkovaia metallurgiiia. Respublikanskii mezhdomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015, iss. 38, pp. 132–141 (in Russian).

6. Babura D. V., П'іушчэнко А. Ф., Осіпов В. А., Звонарев Е. В. Influence of technological production modes on the structure and properties of reactive-sintered ceramics based on silicon carbide. *Poroshkovaia metallurgiiia. Respublikanskii mezhdomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, iss. 40, pp. 73–76 (in Russian).

7. П'іушчэнко А. Ф., Осіпов В. А., Звонарев Е. В., Вітко Ж. А. Reaction-bonded ceramics of $\text{SiC-B}_4\text{C-Si}$ composition: production and some properties. *Sbornik dokladov 9-go Mezhdunarodnogo simpoziuma "Poroshkovaia metallurgiiia: inzheneriia poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka", Minsk, 8–10 aprelia 2015 g. Chast' 1* [Collected papers of the 9th International Symposium "Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding". Minsk, April 8–10, 2015. Part 1]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., pp. 289–305 (in Russian).

Информация об авторах

Звонарев Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь).

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mailbelpak.by

Вітко Жанна Александровна – научный сотрудник, Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: diamantlab@rambler.ru

Осіпов Владимир Анатольевич – старший научный сотрудник, Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: foff2017@mail.ru

Бабуря Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник, Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: babura.dima@mail.ru

Information about the authors

Evgeny V. Zvonarev – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus).

Aliaksandr Ph. Ilyushchanka – Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mailbelpak.by

Zhanna A. Vitko – Researcher, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: diamantlab@rambler.ru

Vladimir A. Osipov – Senior Researcher, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: foff2017@mail.ru

Dmitry V. Babura – Junior Researcher, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: babura.dima@mail.ru