

Научная статья

УДК 661.183.4-911.48

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-57-66

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИТРИДА БОРА НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ SiC–ZrB₂

М.В. Турченко¹, Ю.Е. Лебедева¹, В.А. Прокофьев¹, С.В. Житнюк¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлено получение керамических материалов системы SiC–ZrB₂–BN методом искрового плазменного спекания (ИПС) при температуре 1850–1950 °С. Метод ИПС позволил получить керамический материал с однородной структурой и с размером зерна 0,5–3 мкм. Исследовано влияние количества нитрида бора на механическую обрабатываемость и окислительную стойкость керамики. Установлено, что при содержании нитрида бора 20 % (объемн.) керамический материал сохраняет высокий уровень механических свойств и хорошую степень обрабатываемости, однако обладает низкой окислительной стойкостью.

Ключевые слова: механически обрабатываемая керамика, керамический материал, искровое плазменное спекание, борид циркония, карбид кремния, нитрид бора

Для цитирования: Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Прокофьев В.А., Житнюк С.В. Исследование влияния нитрида бора на механическую обрабатываемость керамического материала системы SiC–ZrB₂ // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-57-66.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE BORON NITRIDE EFFECT ON THE MACHINABILITY OF SiC–ZrB₂ SYSTEM CERAMIC MATERIAL

M.V. Turchenko¹, Yu.E. Lebedeva¹, V.A. Prokofiev¹, S.V. Zhitnyuk¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The production of SiC–ZrB₂–BN system ceramic materials by spark plasma sintering (SPS) at temperatures of 1850–1950 °C is presented. The SPS method made it possible to obtain a ceramic material with a homogeneous structure and a grain size of 0.5–3 μm. The influence of the amount of boron nitride on the machinability and oxidative resistance of ceramics was studied. It has been established that with a boron nitride content of 20 % (vol.), the ceramic material retains a high level of mechanical properties and a good degree of workability, however, it has low oxidative resistance.

Keywords: machined ceramics, ceramic material, spark plasma sintering, zirconium boride, silicon carbide, boron nitride

For citation: Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Prokofiev V.A., Zhitnyuk S.V. Investigation of the boron nitride effect on the machinability of SiC–ZrB₂ system ceramic material. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-57-66.

Введение

Керамика на основе карбида кремния обладает хорошими физико-механическими свойствами – высокими твердостью, износостойкостью и теплопроводностью [1, 2]. Но при этом плохая механическая обрабатываемость карбида кремния создает сложности для широкого применения данной керамики в различных областях промышленности [3, 4]. Для решения этой проблемы в состав керамики (помимо карбида кремния) для снижения твердости вводят различные добавки – например, нитрид бора. Нитрид бора, обладающий графитоподобной слоистой структурой, имеет низкий модуль упругости и слабые силы Ван-дер-Ваальса между уложенными слоями, а также стабильность при высокой температуре благодаря прочной ковалентной связи бора и азота в плоской гексагональной решетке.

Поскольку карбид кремния обладает высокой температурой спекания ($>1800\text{ }^{\circ}\text{C}$), то для ее снижения вводят спекающие добавки, к которым зачастую относят бориды и нитриды переходных металлов [5, 6]. Хорошо известно, что введение диборида циркония в матрицу карбида кремния приводит к повышению значений физико-механических свойств, таких как прочность и вязкость разрушения, а также улучшает окислительную стойкость карбида кремния. В данном исследовании в качестве спекающей добавки использовали диборид циркония [7].

В настоящее время основными способами получения плотной керамики являются горячее прессование, искровое плазменное спекание (ИПС) и спекание без давления.

Горячее прессование является самым распространенным методом получения керамики на основе карбида кремния (SiC). Это обусловлено прочной ковалентной связью и низкой самодиффузией карбида кремния при воздействии температуры и давления. К недостаткам горячего прессования следует отнести ограниченное удаление некоторых примесей (например, SiO_2), что приводит к росту зерна SiC и снижению за счет этого механических свойств материала [8, 9]. Метод ИПС позволяет в несколько раз сократить температуру и длительность процесса спекания по сравнению с традиционными методами реакционного спекания и горячего прессования. Технология основана на прохождении импульса постоянного тока непосредственно через заготовку. При этом генерируются очень высокие скорости нагрева и охлаждения (до $600\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$). Метод ИПС позволяет достичь 100 % уплотнения заготовки при более низких значениях температуры и продолжительности, чем при обычном обжиге или горячем прессовании. Это позволяет исключить нежелательный рост зерен матрицы и деградацию наполнителя во время обжига, а также делает такую технологию экономически более выгодной [10–15]. Свободное спекание без давления позволяет получать заготовку требуемой формы и размеров, но высокие температуры спекания ($1800\text{--}2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) в сочетании с длительной изотермической выдержкой (3–10 ч) приводят к значительному росту зерен во время спекания, а в результате – к снижению прочности материалов.

Из-за ограниченной склонности к спеканию и низкой твердости нитрида бора (BN) сложно получить керамические материалы на его основе с высокой прочностью методами горячего прессования и свободного спекания. В связи с этим для получения керамических материалов выбирают инновационный метод ИПС, исключаяющий рост зерен.

Полученная тем или иным способом заготовка в последующем должна подвергаться механической обработке, по окончании которой получают полноценную деталь из керамики на основе SiC. Сложность механической обработки обусловлена высокой твердостью полученного материала. В качестве возможного метода повышения его обрабатываемости в состав системы SiC–ZrB₂–BN вводится BN в количестве 5, 10, 20 и 30 % (объемн.).

Таким образом, в данной работе предложен способ получения керамического материала системы SiC–ZrB₂–BN с различным содержанием нитрида бора, который должен обладать высокой степенью механической обрабатываемости за счет добавки нитрида бора. Введение в состав материала диборида циркония в качестве спекающей добавки должно привести к повышению окислительной стойкости, прочности и теплопроводности. В качестве метода получения керамического материала системы SiC–ZrB₂–BN в данной работе выбран метод ИПС.

Материалы и методы

Для изготовления композита системы $\text{SiC-ZrB}_2\text{-BN}$ пяти составов с различным содержанием BN: 0, 5, 10, 20 и 30 % (объемн.), использовали коммерчески доступные порошки ZrB_2 , SiC и BN. Контроль размера частиц порошков осуществляли при помощи лазерного анализатора размера частиц. Порошок ZrB_2 предварительно измельчали в планетарной мельнице до среднего размера частиц 0,5–3 мкм. Карбид кремния марки F1200 имел средний размер частиц 3,5 мкм, а исходный порошок гексагонального нитрида бора: 2,37 мкм. Полученные порошки ZrB_2 , SiC и BN сушили в сушильном шкафу до постоянной массы, а затем осуществляли их смешивание на валковой мельнице в течение 16–20 ч. Составы полученных порошковых композиций приведены в табл. 1. Высушенные порошковые смеси спекали в графитовой пресс-форме методом ИПС в вакууме при температуре 1850–1950 °С и давлении 30–40 МПа. Образцы получали в виде дисков диаметром 31,5 мм и высотой 4–5 мм.

Плотность полученных методом ИПС образцов измеряли по ГОСТ 24409–80 (табл. 1). Твердость определяли методом индентирования по Виккерсу с использованием алмазного индентора под нагрузкой 10 кг (100 Н) в течение 15 с. Морфологию фронтальной шлифованной поверхности образца оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Для измерения твердости и исследования морфологии поверхности образцы, полученные методом ИПС, шлифовали и полировали до зеркального блеска поверхности, на которой отсутствовали видимые дефекты, например трещины и сколы. Жаростойкость определяли весовым методом при температуре 1550–1650 °С в течение 2 ч. Образцы для определения жаростойкости помещали на подложку из оксида алюминия. Обрабатываемость композита каждого состава определяли, просверливая отверстия твердосплавным сверлом диаметром 1,7 мм. Сверление является одной из самых сложных операций механической обработки керамики, поскольку в процессе сверления сверло не только вращается, но и проходит вглубь материала, что создает на него значительное механическое воздействие. Сверление позволяет оценить эффективность применения нитрида бора в качестве добавки, способной повысить механическую обрабатываемость полученного материала.

Таблица 1

Составы и плотность керамических материалов системы $\text{SiC-ZrB}_2\text{-BN}$

Содержание нитрида бора в керамическом материале системы $\text{SiC-ZrB}_2\text{-BN}$, % (объемн.)	Теоретическая плотность, г/см ³	Кажущаяся плотность, г/см ³
0	5,52	5,28
5	5,33	4,98
10	5,13	4,97
15	4,74	4,58
20	4,23	3,71

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен внешний вид керамических образцов на основе системы $\text{SiC-ZrB}_2\text{-BN}$ с разным содержанием BN: 5, 10, 20 и 30 % (объемн.).



Рис. 1. Внешний вид керамических образцов на основе системы $\text{SiC-ZrB}_2\text{-BN}$ с содержанием нитрида бора 5, 10, 20 и 30 % (объемн.)

Образцы, полученные методом ИПС при температуре 1850–1950 °С, имеют относительную плотность >87 %.

На рис. 2 представлена микроструктура керамических образцов на основе системы SiC–ZrB₂–BN.

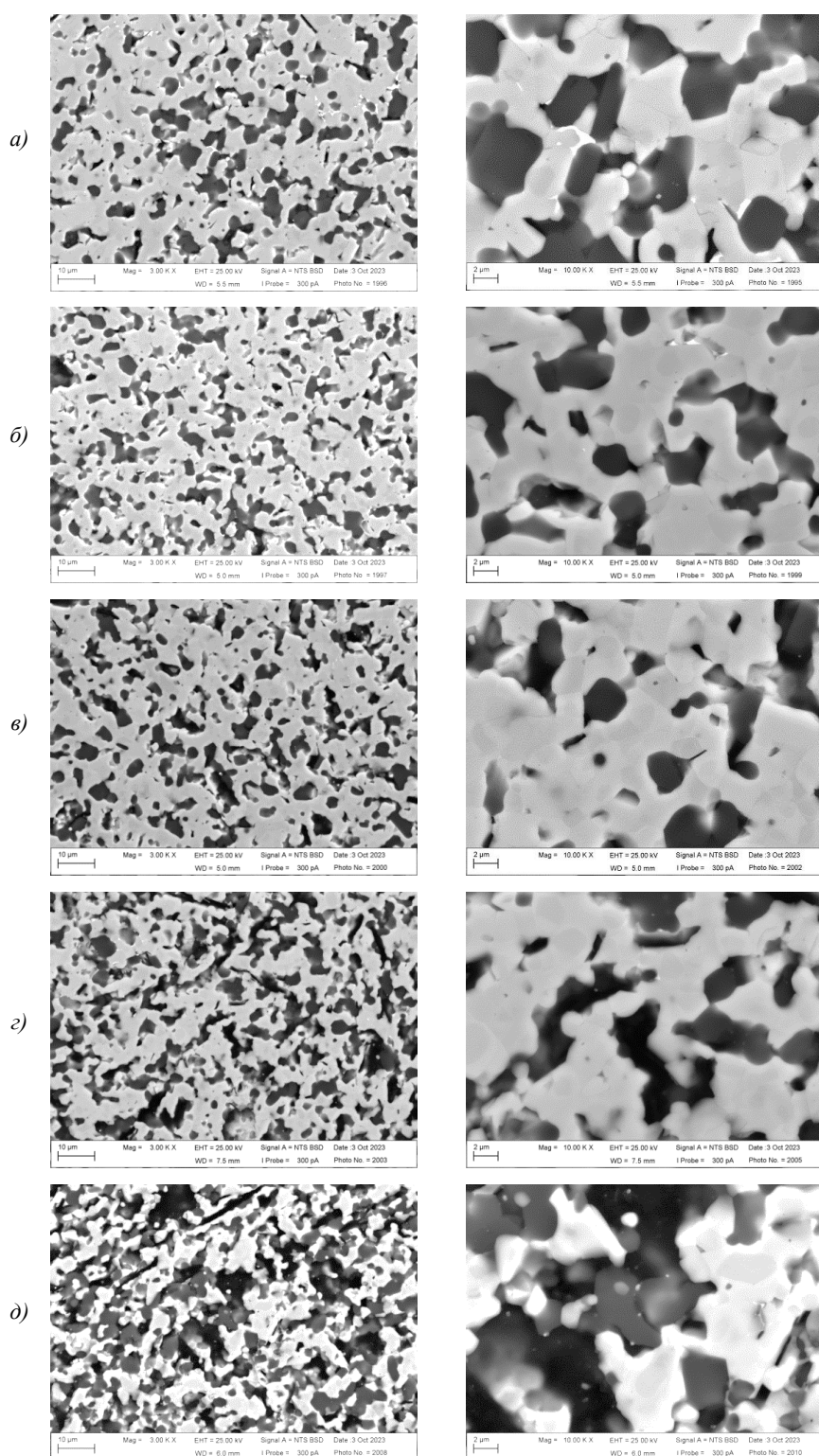


Рис. 2. Микроструктура керамических образцов на основе системы SiC–ZrB₂–BN с содержанием нитрида бора 0 (а), 5 (б), 10 (в), 20 (г) и 30 % (объемн.) (д)

Все образцы имеют однородную микроструктуру. Размер зерна порошков SiC и ZrB₂ в образце без нитрида бора составил в среднем около 2 и 4 мкм соответственно. Зависимость среднего размера зерен от содержания нитрида бора представлена на рис. 3. На средний размер зерен порошка SiC количество BN существенно не повлияло, тогда как зерна порошка ZrB₂ с увеличением количества BN сначала увеличивались, а затем уменьшались. Ускоренный рост зерна порошка ZrB₂ при добавлении небольшого количества BN (5 % (объемн.)), по-видимому, обусловлен увеличением скорости спекания керамического материала. Введение в состав композита >5 % (объемн.) BN привело к торможению роста зерна ZrB₂. Это связано в первую очередь с плохой степенью спекания нитрида бора, который обладает сильной ковалентной связью и пластинчатой структурой. Процесс спекания нитрида бора вызывает сложности, поскольку гетеродесмичность химических связей в его структуре – большая проблема из-за анизотропии, которая изначально присутствует в структуре. Это обусловлено тем, что в структуре нитрида бора отсутствуют прочные связи между слоями [16–20]. По этим же причинам на снимках, полученных при помощи СЭМ, выявлен анизотропный рост пластин нитрида бора при его содержании 20 % (объемн.) и более. С увеличением количества фазы нитрида бора в составе образца происходило искажение зерен BN, что привело к уменьшению размера и соотношения сторон зерна BN. Нитрид бора имеет чешуйчатую морфологию, и его зерна располагаются по границам зерен соединений ZrB₂ и SiC.

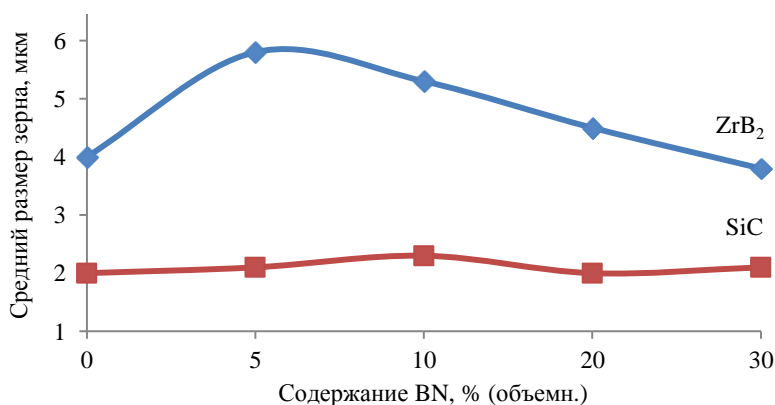


Рис. 3. Зависимость среднего размера зерна соединений SiC и ZrB₂ от количества нитрида бора (BN) в составе керамики

На рис. 4, а приведена зависимость изменения твердости, определенной методом Виккерса, от количества нитрида бора. Увеличение содержания BN существенно снижает твердость композита системы SiC–ZrB₂–BN, что обусловлено мягкостью нитрида бора, имеющего гексагональную структуру, как у графита. Снижение твердости при содержании нитрида бора 5 и 10 % (объемн.) не столь значительно по сравнению со снижением твердости при его содержании 20 и 30 % (объемн.). Это обусловлено тем, что при небольшом содержании нитрида бора его фаза не оказывает существенного влияния – твердость снижается на 23 %, а при содержании нитрида бора 20 и 30 % (объемн.) твердость уменьшается в ~3 раза по сравнению с ее величиной у образца, не имеющего нитрида бора в составе.

Помимо исследования зависимости изменения твердости от содержания нитрида бора, исследована трещиностойкость полученного керамического композита системы ZrB₂–SiC–BN. В результате исследования трещиностойкости получили зависимость ее изменения от содержания нитрида бора (рис. 4, б). При содержании нитрида бора 0–10 % (объемн.) наблюдается существенное повышение трещиностойкости с 3,95 до

8,61 МПа $\sqrt{м}$, при 10–30 % (объемн.) нитрида бора происходит резкое снижение трещиностойкости, что обусловлено введением в состав относительно большого количества материала с более низкой твердостью по сравнению с твердостью частиц порошков SiC и ZrB₂. При содержании нитрида бора в составе до 5 % (объемн.) керамика обладает большим сопротивлением распространению трещины по сравнению с составами, где содержание нитрида бора 5, 10 и 30 % (объемн.). Таким образом, при содержании нитрида бора >10 % (объемн.) в системе SiC–ZrB₂–BN увеличивается вероятность обнаружения трещины в фазе BN, а следовательно, трещиностойкость снижается. Кроме того, крупные агломераты или пластины BN действуют как источники разрушения, вследствие этого снижается прочность материала (в отличие от тонкодисперсных частиц BN, особенно наноразмера).

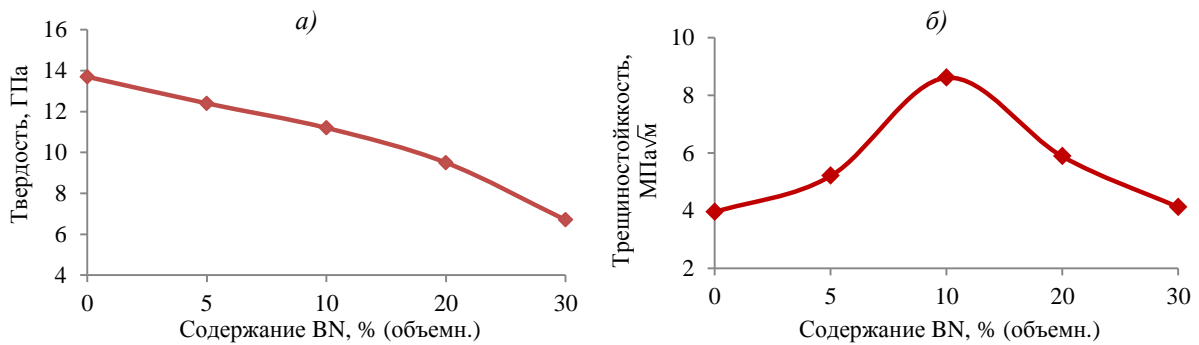


Рис. 4. Зависимость изменения твердости (а) и трещиностойкости (б) от содержания нитрида бора (BN) в составе керамики

Помимо этого, большое количество частиц BN (>10 % (объемн.)) ухудшает степень спекания керамического материала. Так, при введении 10 % (объемн.) нитрида бора в систему ZrB₂–SiC относительная плотность увеличивается, что свидетельствует о положительном влиянии частиц BN на спекание керамики (табл. 2). При содержании нитрида бора >10 % (объемн.) происходит недостаточное спекание и относительная плотность материала снижается на ~2,3 %, при содержании нитрида бора 10–20 % (объемн.) спекание улучшается и относительная плотность материала увеличивается на 1–1,3 %, а при 30 % (объемн.) BN спекание значительно ухудшается и относительная плотность материала снижается на 9 %. Механические свойства полученных керамических материалов, их относительная плотность и окислительная стойкость (изменение массы) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства образцов керамики системы SiC–ZrB₂–BN

Содержание нитрида бора, % (объемн.)	Относительная плотность, %	Твердость, ГПа	Трещиностойкость K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$	Окислительная стойкость при температуре 1600 °С, 2 ч (изменение массы), %
0	95,6	13,7	3,95	1,13
5	93,4	12,4	5,20	1,81
10	96,9	11,2	8,61	2,32
20	96,6	9,5	5,88	2,78
30	88,0	6,7	4,12	3,02

Окислительную стойкость полученной керамики определяли при температуре 1600 °С в течение 2 ч. Образцы с содержанием нитрида бора ≥ 5 % (объемн.) имеют

меньшую окислительную стойкость (изменение массы 1,81–3,02 %) по сравнению с образцом, в котором нитрид бора отсутствует (изменение массы 1,13 %). Снижение массы образцов с увеличением содержания нитрида бора в составе керамики обусловлено высокой степенью окисления BN при температурах >800 °C. В процессе окисления на поверхности керамики образуется слой боросиликатного стекла. С увеличением количества нитрида бора изменение массы керамики увеличивается – идет более активное окисление.

Исследование механической обрабатываемости полученных композитов показало, что керамический композиционный материал системы SiC–ZrB₂–BN поддается сверлению твердосплавным инструментом только при содержании нитрида бора >20 % (объемн.). На рис. 5 представлен внешний вид образцов керамики с содержанием нитрида бора 0, 5, 10, 20 и 30 % (объемн.) после механической обработки твердосплавным сверлом. При содержании нитрида бора <20 % (объемн.) композит плохо поддается сверлению из-за недостаточного количества соединения BN. Улучшение механической обрабатываемости керамики с повышением количества нитрида бора обусловлено его низкой твердостью и способностью к механической обработке. На рис. 6 показано отверстие для составов с содержанием нитрида бора 10 и 20 % (объемн.).

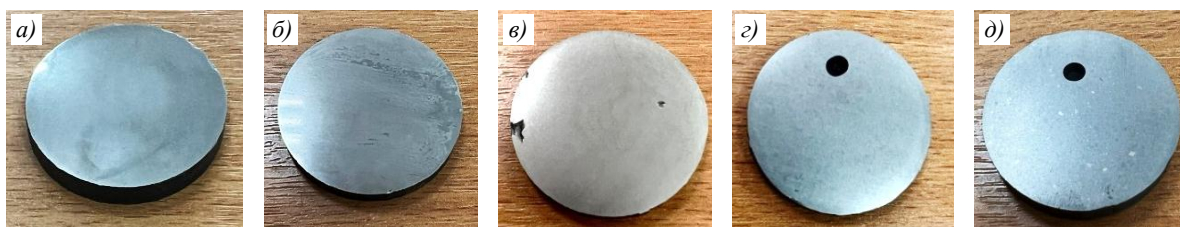


Рис. 5. Внешний вид керамики на основе системы SiC–ZrB₂–BN с содержанием нитрида бора 0 (а), 5 (б), 10 (в), 20 (г) и 30 % (объемн.) (д) после механической обработки твердосплавным сверлом



Рис. 6. Внешний вид ($\times 300$) отверстия после механической обработки твердосплавным сверлом керамики на основе системы ZrB₂–SiC–BN с содержанием нитрида бора 10 (а) и 20 % (объемн.) (б)

Заключения

Из порошков соединений SiC, ZrB₂ и BN методом ИПС получены керамические материалы системы SiC–ZrB₂–BN с достаточно однородной структурой. Размер зерен порошка ZrB₂ увеличивался при добавлении небольшого количества нитрида бора в состав композита (<5 % (объемн.)), а при добавлении >5 % (объемн.) средний размер зерна порошка ZrB₂ уменьшался из-за плохой спекаемости нитрида бора. Исследование микроструктуры керамики позволило обнаружить анизотропный рост пластин нитрида бора при его содержании >20 % (объемн.), что плохо повлияло на его твердость

и трещиностойкость. С увеличением содержания нитрида бора с 5 до 30 % (объемн.) твердость полученных керамических материалов уменьшилась с 12,4 до 6,7 ГПа. Трещиностойкость полученного материала с увеличением содержания нитрида бора сначала существенно увеличивается, а затем начинает снижаться при содержании нитрида бора >10 % (объемн.). Окислительная стойкость снижается с увеличением содержания нитрида бора в составе композита за счет более активного окисления под воздействием высокой температуры. Керамический материал, содержащий 20 % (объемн.) BN, поддается механической обработке, имеет хорошие механические свойства (твердость 9,5 ГПа, трещиностойкость $5,88 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$), но низкую окислительную стойкость – изменение массы при температуре 1600 °С в течение 2 ч составляет 2,78 %.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ А.С. Чайниковой, И.В. Осину, Г.Н. Головкину, И.О. Беляченкову за ценные консультации и обсуждение результатов работы.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
2. Сорокин О.Ю., Кузнецов Б.Ю., Лунегова Ю.В., Ерасов В.С. Высокотемпературные композиционные материалы с многослойной структурой (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 4–5 (88). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-42-53.
3. Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д. Высокотемпературные бориды. М.: Металлургия, 1991. 368 с.
4. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.St. Perspective High-Temperature Ceramic Composite Materials // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 986–991.
5. Кулагин Н.Д. Высокотемпературные многокомпонентные керамические материалы на основе карбидов: получение, структура, окислительное поведение: бакалаврская работа. Томск, 2022. 92 с. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/71841> (дата обращения: 01.12.2023).
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 20–24.
7. Житнюк С.В. Влияние спекающих добавок на свойства керамики на основе карбида кремния (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86.
8. Житнюк С.В., Сорокин О.Ю., Журавлева П.Л. Керамика на основе карбида кремния, полученная спеканием гранулированного порошка // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-50-59.
9. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Качаев А.А. Способы соединения керамических композиционных материалов на основе SiC с керамическими и металлическими материалами (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-75-83.
10. Бурлаченко А.Г., Буякова С.П., Мировой Ю.А., Дедова Е.С. Кинетика самозалечивания в высокотемпературных керамиках $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. XXI Междунар. симпозиума: в 2 ч. Минск: Издательский дом «Белорусская наука», 2019. Ч. 1. С. 431–435.
11. Орданьян С.С., Несмелов Д.Д., Новоселов Е.С. Статистическая оценка механических характеристик горячепрессованной керамики в системе $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 82. С. 150–160.

12. Пушкарев О.И., Уманский А.П. Получение износостойкой композиционной керамики на основе карбида кремния методом горячего прессования // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив–99. Волгоград, 1999. С. 45–47.
13. Кузнецов Б.Ю., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л., Осин И.В. Синтез модельных высокотемпературных керамических матриц методом искрового плазменного спекания и изучение их свойств для получения композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
14. Ваганова М.Л., Сорокин О.Ю., Осин И.В. Соединение керамических материалов методом искрового плазменного спекания // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 306–317. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-306-317.
15. Сорокин О.Ю., Солнцев С.Ст., Евдокимов С.А., Осин И.В. Метод гибридного искрового плазменного спекания: принцип, возможности, перспективы применения // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S6. С. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-11-16.
16. Баринов В.Ю., Рогачев А.С., Вадченко С.Г., Московских Д.О., Колобов Ю.Р. Искровое плазменное спекание изделий сложной формы с использованием квазиизостатического прессования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 1–3. С. 312–315.
17. Авраменко В.А., Папынов Е.К., Шичалин О.О. и др. Искровое плазменное спекание как инновационный подход в создании наноструктурированных керамик нового поколения // Наноматериалы и технологии: сб. VI Междунар. конф. «Наноматериалы и технологии», V Междунар. конф. по материаловедению и II Междунар. конф. по функциональным материалам. Улан-Удэ, 2016. С. 82–90.
18. Перевислов С.Н. Структура, свойства и области применения графитоподобного гексагонального нитрида бора // Новые огнеупоры. 2019. № 6. С. 35–40.
19. Способ получения огнеупорной смеси, содержащей нитрид бора: пат. 2021124557 Рос. Федерация; заявл. 19.08.21; опубл. 08.11.21.
20. Дудченко Н.В., Червоний И.Ф. Исследование технологии гексагонального нитрида бора // ScienceRise. 2016. Т. 12. № 2 (29). С. 31–34.

References

1. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace technology of the XXI century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
2. Sorokin O.Yu., Kuznetsov B.Yu., Lunegova Yu.V., Erasov V.S. High-temperature composites with a multi-layered structure (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 4–5 (88), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-42-53.
3. Serebryakova T.I., Neronov V.A., Peshev P.D. *High temperature borides*. Moscow: Metallurgiya, 1991, 368 p.
4. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.St. Perspective High-Temperature Ceramic Composite Materials. *Russian Journal of General Chemistry*, 2011, vol. 81, no. 5, pp. 986–991.
5. Kulagin N.D. *High-temperature multicomponent ceramic materials based on carbides: preparation, structure, oxidative behavior*: bachelor's thesis. Tomsk, 2022, 92 p. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/71841> (accessed: December 01, 2023).
6. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. Promising high-temperature ceramic composite materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 20–24.
7. Zhitnyuk S.V. Effect of sintering additives on the properties of silicon carbide-based ceramics (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86.
8. Zhitnyuk S.V., Sorokin O.Yu., Zhuravleva P.L. Silicon carbide ceramics obtained by sintering granular powder. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-50-59.

9. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Kachaev A.A. Methods for joining ceramic composite materials based on SiC with ceramic and metallic materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-75-83.
10. Burlachenko A.G., Buyakova S.P., Mirova Yu.A., Dedova E.S. Kinetics of self-healing in high-temperature ZrB₂-SiC ceramics. *Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding: Sat. report XXI Int. symposium: at 2 parts*. Minsk: Publishing house «Belarusian Science», 2019, part 1, pp. 431–435.
11. Ordanyan S.S., Nesmelov D.D., Novoselov E.S. Statistical assessment of the mechanical characteristics of hot-pressed ceramics in the ZrB₂-SiC system. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2023, no. 82, pp. 150–160.
12. Pushkarev O.I., Umansky A.P. Preparation of wear-resistant composite ceramics based on silicon carbide by hot pressing. *Processes of abrasive processing, abrasive tools and materials. Sanding abrasive – 99*. Volgograd, 1999, pp. 45–47.
13. Kuznetsov B.Yu., Sorokin O.Yu., Vaganova M.L., Osin I.V. Synthesis of model high-temperature ceramic matrices by the method of spark plasma sintering and the study of their properties for the production of composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
14. Vaganova M.L., Sorokin O.Yu., Osin I.V. Joining of ceramic materials by the method of spark plasma sintering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 306–317. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-306-317.
15. Sorokin O.Yu., Solntsev S.St., Evdokimov S.A., Osin I.V. Hybrid spark plasma sintering method: principle, possibilities, future prospects. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S6, pp. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-11-16.
16. Barinov V.Yu., Rogachev A.S., Vadchenko S.G., Moskovskikh D.O., Kolobov Yu.R. Spark plasma sintering of complex-shaped products using quasi-isostatic pressing. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2016, no. 1–3, pp. 312–315.
17. Avramenko V.A., Papynov E.K., Shichalin O.O. et al. Spark plasma sintering as an innovative approach to the creation of new generation nanostructured ceramics. *Nanomaterials and technologies: VI Int. conf. «Nanomaterials and technologies», V Int. conf. in materials science and II Int. conf. on functional materials*. Ulan-Ude, 2016. pp. 82–90.
18. Perevislov S.N. Structure, properties and areas of application of graphite-like hexagonal boron nitride. *Novye ognepory*, 2019, no. 6, pp. 35–40.
19. Way of receiving the fire-resistant mix containing boron nitride: pat. 2021124557 Rus. Federation; appl. 19.08.21; publ. 08.11.21.
20. Dudchenok N.V., Chervoniy I.F. Research on hexagonal boron nitride technology. *ScienceRise*, 2016, vol. 12, no. 2 (29), pp. 31–34.

Информация об авторах

Турченко Максим Витальевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лебедева Юлия Евгеньевна, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Прокофьев Владимир Алексеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Житнюк Сергей Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maksim V. Turchenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yulia E. Lebedeva, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir A. Prokofiev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Zhitnyuk, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.01.2024.
The article was submitted 21.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 12.01.2024.