

УДК 621.762 .34

**СТРУКТУРА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА, ПОДВЕРГНУТОЙ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

С.В. Устюжанин

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
Институт сильноточной электроники СО РАН,
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3, 634055
E-mail: svu5@tpu.ru

**STRUCTURE OF CERAMICS BASED ON BORON CARBIDE AFTER HIGH-SPEED
THERMAL TREATMENT**

S.V. Ustyuzhanin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Sci. (Phys.–Math.). Yu.F. Ivanov
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
Institute of High Current Electronics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,
Tomsk, Akademicheskoy Avenue, 2/3, 634055
E-mail: svu5@tpu.ru

***Abstract.** Boron carbide ceramics are produced by SPS sintering. The presence in the ceramic samples of particles of the second phase located at the joints of grain boundaries was revealed. High-speed thermal treatment of ceramics by a pulsed electron beam has been carried out. Revealed the dissolution of inclusions of the second phase.*

Введение. Карбид бора, благодаря высоким значениям твердости (49,1 ГПа) и упругих постоянных (модуль упругости 450 ГПа) при низком удельном весе (2,52 г/см³) и высокой температуре плавления (2718 К), нашел широкое применение в качестве основы конструкционных материалов, применяемых в машиностроении, космической, ядерной и других отраслях, а также при производстве бронематериалов [1, 2]. Известно, что многократное повышение эксплуатационных характеристик керамических материалов, в том числе и керамики из карбида бора, может быть достигнуто созданием наноразмерной однородной структуры с предельно высокой плотностью [3]. Одним из быстро развивающихся методов модификации структуры металлов и сплавов, металлокерамических и керамических материалов, позволяющим формировать многофазные наноструктурированные поверхностные слои, является метод, основанный на использовании низкоэнергетических импульсных электронных пучков [4]. Сверхвысокие скорости (до 10⁹ К/с) нагрева до температур плавления и последующего охлаждения тонкого поверхностного слоя материала (10⁻⁷–10⁻⁸ м), формирование предельных градиентов температуры (10⁷–10⁸ К/м), обеспечивающих охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в интегрально холодный объем материала со скоростью (10⁴ – 10⁹) К/с создают условия для образования в поверхностном слое аморфной, нано- и субмикроструктурной структуры [4].

Целью работы является обнаружение и анализа закономерностей преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя керамики из карбида бора, облученной низкоэнергетическим импульсным электронным пучком.

Экспериментальная часть. Керамические образцы для исследований в форме диска диаметром 15 мм и толщиной 2,5 мм были изготовлены методом SPS спекания на установке Labox-1575 (Sinter Land) в Институте гидродинамики СО РАН (г. Новосибирск) при давлении прессования 30 МПа и температуре ~ 2223 К. Для изготовления образцов был использован порошок B_4C субмикронных (средний размер частиц порошка 0,8 мкм) размеров с добавкой 10 мас. % нанопорошка карбида бора. После спекания для проведения дальнейших исследований образцы последовательно шлифовали и полировали алмазными пастами до шероховатости $Ra \approx 0,025$ мкм. Одна часть образцов облучалась низкоэнергетическим импульсным электронным пучком. Облучение проводили на установке SOLO (ИСЭ СО РАН) при давлении остаточного газа (аргон) в рабочей камере 10^{-2} Па пучком электронов со следующими параметрами: энергия электронов $U = 15$ кэВ, плотность энергии пучка электронов 15 Дж/см², длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов $0,3$ с⁻¹. Исследование морфологии, фазового и элементного состава керамики до и после облучения электронным пучком осуществляли, используя аналитическое оборудование Нано-центра Национального исследовательского Томского политехнического университета: сканирующий электронный микроскоп JEOL SEM-7500FA, дифрактометр Shimadzu XRD-7000, просвечивающий электронный микроскоп JEOL JEM-2100F.

Результаты. Методами рентгеноструктурного анализа установлено, что в не облученных образцах керамики основной фазой является карбид бора состава $B_{13}C_2$, дополнительным (вторыми) фазами – CaB_6 (1,5 %) и Fe_2B (0,2 %). Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии выявлено, что частицы вторых фаз расположены преимущественно в стыках границ зерен керамики (рис. 1а, включения указаны стрелками). Размеры частиц изменяются в пределах (300 – 700) нм. После облучения керамики импульсным электронным пучком относительное содержание вторых фаз изменилось: CaB_6 (2,6 %) и Fe_2B (0,3 %).

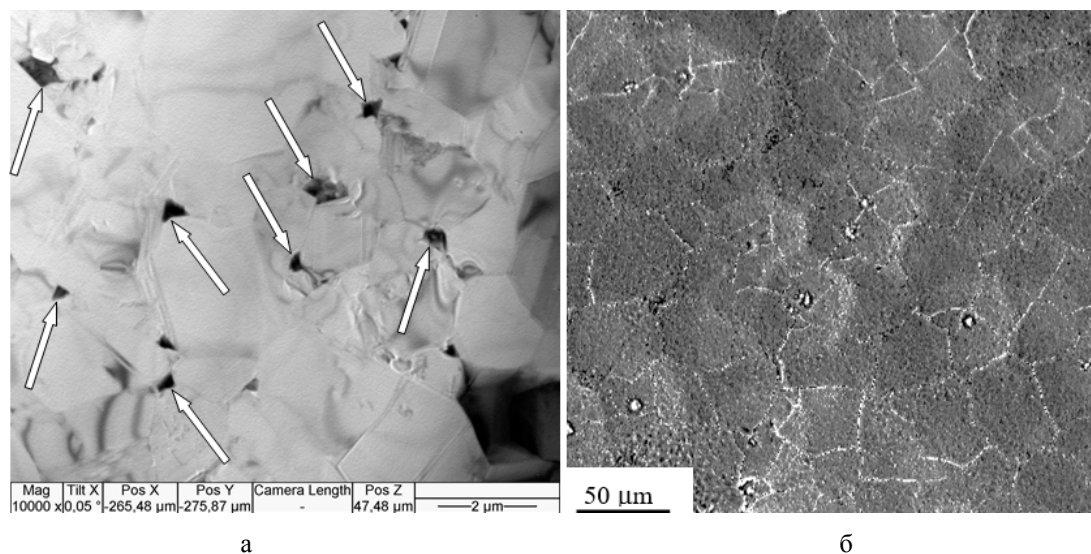


Рис. 1. Структура керамики B_4C в исходном состоянии (а) и облученной импульсным электронным пучком (б); изображения получены методами просвечивающей (а) и сканирующей (б) электронной микроскопии. На (а) стрелками указаны частицы второй фазы

Методами сканирующей (рис. 1б) и просвечивающей (рис. 2) электронной микроскопии установлено, что облучение керамики импульсным электронным пучком приводит, во-первых, к диспергированию частиц второй фазы. Размер частиц снижается до (30 – 100) нм (рис. 2). Во-вторых, частицы равномерно распределены вдоль границ зерен карбида бора, образуя протяженные прослойки (рис. 2б). Очевидно, что такое изменение структуры керамики будет способствовать снижению хрупкости и повышению коррозионной стойкости материала.

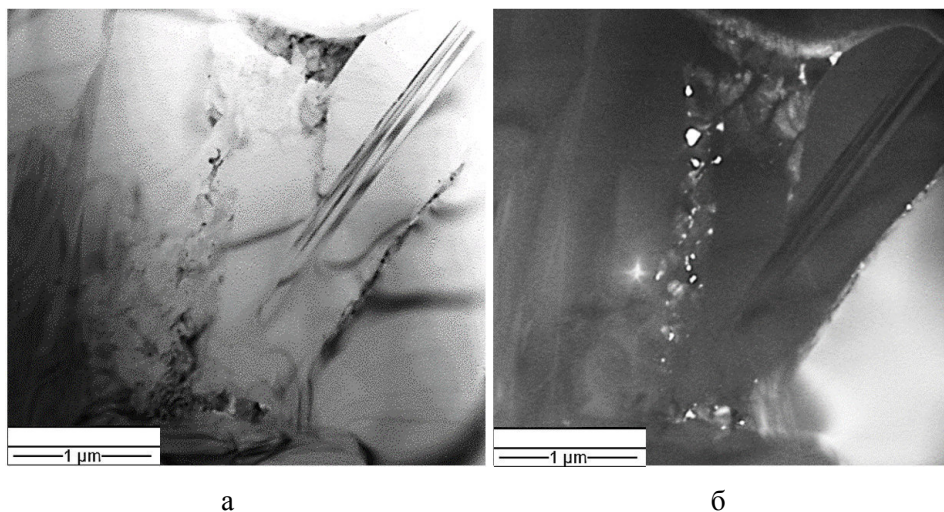


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры керамики на основе карбида бора, облученной импульсным электронным пучком; а – светлое поле; б – темное поле

Заключение. Установлено, что облучение поверхности керамики карбида бора импульсным электронным пучком в предплавильном режиме приводит к диспергированию включений второй фазы и равномерному их распределению вдоль границ зерен. Высказано предположение, что формирование подобной структуры будет способствовать повышению трещиностойкости исследуемой керамики.

Работа выполнена по теме Госзадание "Наука" FSWW-2020-0014(5.0017.Г.З.Б.2020) и при поддержке гранта РФФИ (проект №19-48-700010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислый П.С., Кузнецова М.А. Карбид бора. – Киев: Наукова думка, 1988. – 216 с.
2. Келина, И.Ю., Голубева Н.А., Ленский В.В. и др. Ударопрочные керамические материалы на основе SiC и B₄C // Вопросы оборонной техники: науч.-техн. сб. – Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: НТЦ «Информтехника», 2012. – Вып. 1 (164) – 2 (165). – С. 59–69.
3. Иванов В.В., Кайгородов А.С., Хрустов В.Р. Прочная керамика на основе оксида алюминия, получаемая с использованием магнитно-импульсного прессования нанопорошков // Российские нанотехнологии. – 2006. – № 1–2. – С. 201–207.
4. Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими высокоточными электронными пучками. – Новосибирск: СО РАН: Наука, 2019. – 348 с.