

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА, ОБЛУЧЕННОЙ ИНТЕНСИВНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Ю.Ф. Иванов, д.ф.-м.н., проф.,

М.С. Петюкевич, аспирант,

В.В. Полисадова, к.т.н., н.с.

А.С. Братухина, магистрант гр. 4БМ32

Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,

тел.(3822)-606-160

E-mail: petukevich@tpu.ru

Карбид бора имеет относительно низкую плотность, является одним из наиболее твердых материалов, обладает высокой химической стойкостью в различных агрессивных средах, имеет высокое сечение захвата нейтронов. Исходя из перечисленных свойств, основными областями применения карбида бора являются производство легкой брони, абразивного и режущего материала, термо- и электроизоляционного материала и материала для устройств в микроэлектронике, активно используется в атомной энергетике [1-3]. Недостатком изделий из карбида бора является низкая трещиностойкость. Одним из способов преодоления данного недостатка является наноструктуризация материала. Формирование наноструктурного состояния позволяет локализовать пластическую деформацию материала на самом низком масштабном уровне. Последнее обеспечивает более равномерное распределение упругих напряжений в материале и повышает энергию зарождения критических концентраторов напряжения [4, 5]. Сказанное особенно важно для хрупких керамических материалов.

Перспективным инструментом, позволяющим наноструктурировать поверхностные слои различных материалов, являются низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности воздействия [6]. Сверхвысокие скорости (до 10^9 К/с) нагрева до температур плавления и последующего охлаждения тонкого поверхностного слоя материала (10^{-7} – 10^{-8} м), формирование предельных градиентов температуры (10^7 – 10^8 К/м), обеспечивающих охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в интегрально холодный объем материала со скоростью (10^4 – 10^9) К/с создают условия для образования в поверхностном слое аморфной, нано- и субмикроструктурной структуры.

Целью настоящей работы являлось обнаружение и анализ закономерностей преобразования структуры, фазового состава и свойств поверхностного слоя керамики из карбида бора, подвергнутой облучению низкоэнергетическим интенсивным электронным пучком.

Образцы керамики карбида бора были изготовлены методом SPS спекания на установке Labox-1575 (SinterLand) при давлении прессования 30 МПа и температуре ~1950 °С. После спекания образцы последовательно шлифовали и полировали алмазными пастами до шероховатости $R_a \approx 0,025$ мкм. Облучение проводили на установке SOLO (ИСЭ СО РАН) [6] 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 5 Дж/см², длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов $0,3$ с⁻¹, количество импульсов 3. 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, сканирующий зондовый микроскоп Integra Aura. Измерения твердости спечённой керамики проводили на динамическом ультрамикротвердомере (наноинденторе) Shimadzu DUH-211S. Структуру полированного шлифа выявляли реактивом Мураками.

Травление шлифов керамики выявило поликристаллическую структуру, размеры зерен которой изменяются в пределах от 1,5 мкм до 6 мкм. В сравнительно крупных зернах обнаруживается пластинчатая структура, характерная для структуры микродвойников. Преимущественно по границам и в стыках зерен обнаруживаются микропоры.

Облучение керамики интенсивным электронным пучком, не изменяя фазовый состав материала (рис. 1), привело к формированию беспористого поверхностного слоя толщиной ≈ 15 мкм и способствовало существенному преобразованию структуры поверхностного слоя, заключающемуся, во-первых, в уменьшении размера зерен (продольные размеры зерен составляют (2–4) мкм; поперечные – (0,5–0,8) мкм), во-вторых, в формировании субзеренной структуры, представленной микродвойниками (рис. 2, а).

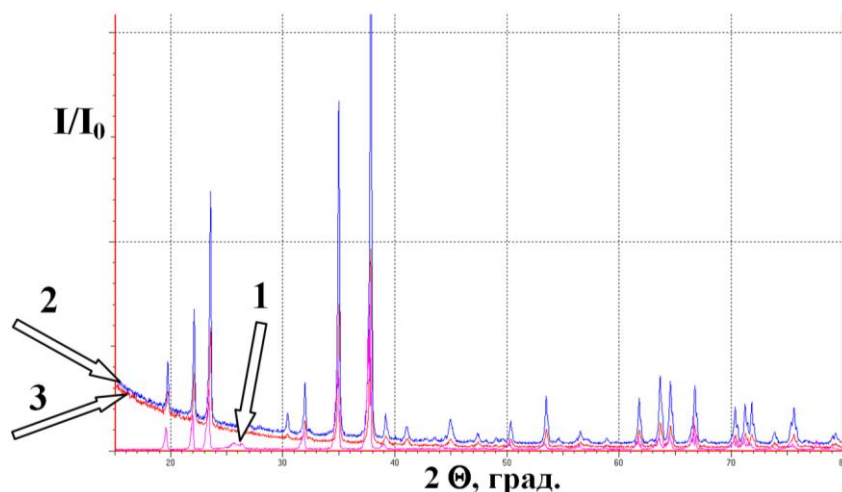


Рис. 1. Участки рентгенограмм, полученных с исходного порошка (1), спеченной керамики (2) и поверхностного слоя керамики, модифицированного интенсивным электронным пучком (3).

Наиболее отчетливо модифицирование структуры керамики интенсивным электронным пучком выявляется при исследовании поверхностей хрупкого разрушения (рис. 2). Сопоставляя характерные изображения структуры излома спеченной керамики (рис. 2, б) и керамики, облученной интенсивным электронным пучком (рис. 2, в), можно отметить следующие особенности. Во-первых, излом керамики в исходном состоянии и после облучения электронным пучком является хрупким. Во-вторых, излом спеченной керамики протекает по механизму интеркристаллитного разрушения материала; скол происходит преимущественно по границам раздела кристаллитов. Разрушение модифицированного электронным пучком слоя керамики осуществляется по смешанному интеркристаллитному и транскристаллитному механизмам. Размеры фасеток внутризеренного скола

изменяются в пределах (100-150) нм, что позволяет говорить о наноструктурировании керамики на основе карбида бора электронным пучком. При этом можно предположить, что механизмом наноструктурирования керамики при облучении электронным пучком является двойникование материала. В свою очередь, причиной формирования микро – и наноразмерных двойников являются упругие напряжения, возникающие в поверхностном слое материала вследствие сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения, реализующихся при воздействии на облучаемую поверхность высокоинтенсивных импульсных электронных пучком [7].

Таким образом, выполненные исследования показывают, что облучение спеченной керамики на основе карбида бора интенсивным импульсным электронным пучком приводит к формированию беспористой поликристаллической структуры с более мелким (относительного спеченного состояния) зерном. Микродвойники, являющиеся механизмом релаксации упругих полей напряжений, формируют внутризеренную структуру облученной керамики. Микродвойникование привело к смене механизма разрушения керамики – переходу от исключительно интеркристаллитного разрушения к преимущественно транскристаллитному. Очевидно, что подобная смена механизма разрушения предполагает высокую микропластичность модифицированного слоя керамики B_4C . Отметим, что пластифицирование поверхностного слоя не привело к снижению механических характеристик керамики: твердость исходной и облученной электронным пучком керамики одинакова и составляет ≈ 35 ГПа.

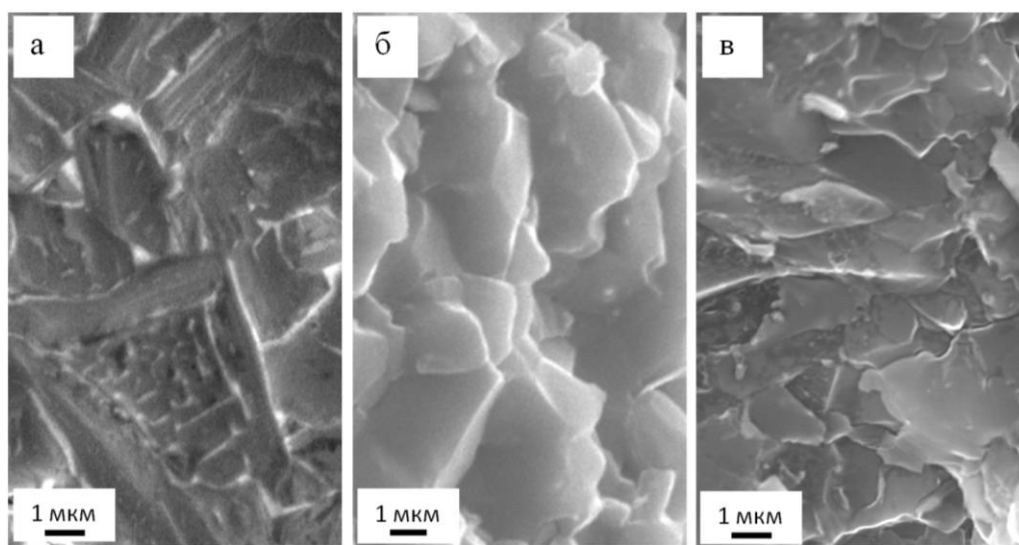


Рис. 2. Микроструктура керамики на основе карбида бора: а) структура поверхности после облучения интенсивным электронным пучком; б) структура поверхности излома спеченной керамики; в) структура поверхности излома керамики, облученной интенсивным электронным пучком.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания «Наука».

Список литературы:

1. Кислый П.С., Кузнецова М.А. Карбид бора. – Киев: Наукова думка, 1988. – 216 с.

2. Domnich V., Reynaud S., Haber R.A., Chhowalla M. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress // J. Am. Ceram. Soc. – 2011. – Vol. 94. – №. 11. – P. 3605-3628.

3. Андриевский Р.А. Микро- и наноразмерный карбид бора: синтез, структура и свойства // Успехи химии. – 2012. – Т. 81. – № 6. – С. 549-559.

4. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. - Новосибирск: Наука, 1995.-Т.1. – 298 с.

5. Нанотехнологии поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий / Отв. ред. Н.З. Ляхов, С.Г. Псахье; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт физики прочности и материаловедения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 276 с.

6. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев [и др.]; под ред. А.П. Ласковнева, Минск, «Беларус. навука», 2013. – 287 с.

7. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. Chapter 6 in Book “Materials surface processing by directed energy techniques”. - P. 205-240. Ed. by Y. Pauleau: Elsevier. – 2006. – 763 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЫСОКОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕННОМ КАНАЛЕ В ПРИСУТСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Е.С. Вагин, ассистент

В.П. Григорьев, д.ф.-м.н., профессор

Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,

тел.(3822)-606-138

E-mail: VaginEvS@yandex.ru

Введение. Повышенный интерес к прикладному использованию сильноточных электронных пучков (СЭП) предопределен их уникальными возможностями по транспортировке энергий высокой плотности на достаточно большие расстояния без существенных потерь, а также эффективной передачи этой энергии объекту воздействия. Большой интерес представляет использование электронных пучков с такими параметрами в различных технологических процессах, связанных с изменением состояния и свойств поверхности материалов.

Эффективная транспортировка пучков с высокими плотностями тока и низкими энергиями (десятки кэВ) электронов возможна только при обеспечении практически полной зарядовой нейтрализации [1]. Для этого транспортировку низкоэнергетических СЭП осуществляют, инжектируя их в плазму или нейтральный газ низкого давления (10–1...10–2 Па). Кроме того, собственное магнитное поле может вызывать самопинчевание пучка, тем самым препятствуя эффективной транспортировке электронов. Для подавления данного эффекта необходима