

**ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ  
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

А.А. Леонов<sup>1,2</sup>, С.В. Устюжанин<sup>1</sup>

Научный руководитель: к.т.н., В.В. Полисадова<sup>1</sup> и профессор, д.ф.-м.н., Ю.Ф. Иванов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический 2/3, 634055

E-mail: [laa91@tpu.ru](mailto:laa91@tpu.ru)

**IMPROVE OF MECHANICAL PROPERTIES OF SILICON CARBIDE CERAMICS BY MEANS OF  
ELECTRON-BEAM TREATMENT**

A.A. Leonov<sup>1,2</sup>, S.V. Ustyuzhanin<sup>1</sup>

Scientific Supervisor: Ph.D., V.V. Polisadova<sup>1</sup> and Prof., Dr. Y.F. Ivanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenina Ave., 30, 634050

<sup>2</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia, Tomsk, 2/3 Akademicheskoy Ave., 634055

E-mail: [laa91@tpu.ru](mailto:laa91@tpu.ru)

***Abstract.** Study results of the phase composition, microstructure and mechanical properties of the surface layer of SiC-ceramics treated by an intense pulsed low-energy electron beam are presented. It is shown that irradiation leads to the formation of a nanostructured state and an increase SiC-15R polytype content, which is accompanied by improved mechanical properties of the SiC surface layer.*

**Введение.** Карбид кремния относится к классу бескислородных керамик и является одним из широко используемых конструкционных материалов в машиностроении, атомной энергетике, для изготовления легкой брони. Уникальность свойств карбида кремния во многом обусловлена его способностью кристаллизоваться в различных модификациях (политипах), количество которых превышает 200 и которые значительно отличаются по свойствам и электрофизическим параметрам. Это делает тот или иной политип предпочтительным для различного применения. На сегодняшний день практический интерес представляют только политипы с гексагональной элементарной ячейкой  $\alpha$ -SiC-6H  $\alpha$ -SiC-4H и кубической  $\beta$ -3C. Вопрос о механизме образования политипных фаз в SiC по-прежнему актуален, поскольку не существуют универсальные технологические приемы, приводящие к исключительному росту конкретного политипа [1]. Одним из способов повышения служебных характеристик керамических материалов является формирование в нем субмикро- и нанокристаллического состояния. К числу современных подходов управления микроструктурой и свойствами изделия из керамических материалов относится метод модификации поверхности материала интенсивными импульсными низкоэнергетическими (до 30 кэВ) электронными пучками субмиллисекундной длительности. Воздействие таких пучков на металлы, сплавы, металлокерамические и керамические материалы сопровождается формированием в поверхностном слое изделия аморфной, нано- и субмикроструктурной структуры, способствуя значительному улучшению физико-

химических, электрофизических, прочностных, триботехнических, усталостных и многих других свойств [2-5]. Целью данной работы являлось установление закономерностей структурно-фазового преобразования и изменения прочностных свойств поверхностного слоя SiC керамики, обработанной интенсивным импульсным электронным пучком.

**Материалы и методы исследования.** Образцы из SiC керамики, изготовленные в форме таблеток диаметром 14 мм и толщиной 3 мм, были получены методом SPS-спекания (электроимпульсное плазменное спекание) при режиме спекания:  $T_{\text{спек}} = 2100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{пресс}} = 70 \text{ МПа}$ ,  $\tau_{\text{спек}} = 10 \text{ мин}$ . Основной фазой порошка карбида кремния является политип с гексагональной элементарной ячейкой SiC-6H, также присутствует в небольшом количестве политип с ромбоэдрической элементарной ячейкой SiC-15R (табл. 1). Модификация поверхностного слоя керамики осуществлялась интенсивным импульсным электронным пучком на установке СОЛО (ИСЭ СО РАН) с параметрами пучка: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов  $20 \text{ Дж/см}^2$  при длительности импульса 200 мкс и количестве импульсов 3 (при давлении остаточного газа (аргон) в рабочей камере  $10^{-2} \text{ Па}$ ). Исследования структурно-фазового состояния в поверхностном слое керамики до и после воздействия пучка электронов проводились на оборудовании Нано-Центра ТПУ. Анализ структуры и фазового состава поверхностного слоя керамики проведен на сканирующем электронном микроскопе JEOL SEM-7500FA и дифрактометре Shimadzu XRD-7000, физико-механические характеристики определяли методом динамической нанотвердометрии алмазной пирамидкой Берковича в режиме «нагрузка-разгрузка» при нагрузке  $P = 100 \text{ мН}$  (нанотвердомер DUN-211S, Shimadzu).

**Результаты и их обсуждение.** Рентгенофазовые исследования SiC керамики в исходном (до облучения электронным пучком) состоянии показали, что основу материала составляет политип  $\alpha$ -SiC-6H, относительное содержание которого 88,8 отн. %, в существенно меньших количествах (10,2 отн. %) присутствует политип  $\alpha$ -SiC-15R (остальное – кремний). Облучение керамики электронным пучком приводит к увеличению в материале относительного содержания политипа  $\alpha$ -SiC-15R более чем в два раза (табл. 1).

Таблица 1

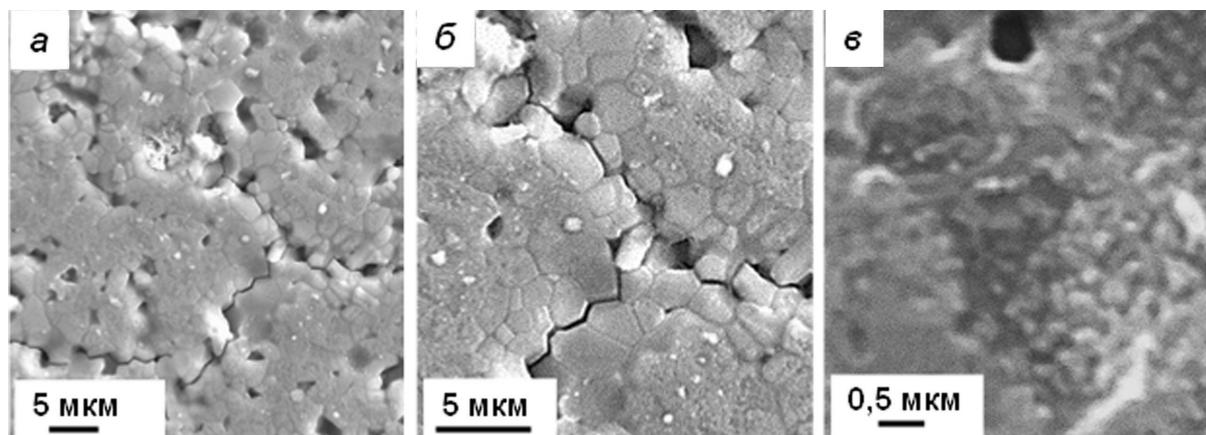
*Политипный состав керамики карбида кремния до и после облучения электронным пучком*

Состояние	Политипный состав, %		Размер ОКР, нм	
	SiC-6H	SiC-15R	$D_{\text{SiC-6H}}$	$D_{\text{SiC-15R}}$
До облучения	88,80	10,20	89,19	63,93
После облучения	73,86	21,56	64,41	25,41

Облучение SiC-керамики электронным пучком, сопровождается фрагментацией поверхностного слоя, размеры фрагментов изменяются в пределах от 20 мкм до 40 мкм (рис. 1, а, б). В центральной области фрагментов формируется нанокристаллическая структура (рис. 1, в). Размеры кристаллитов изменяются в пределах от 100 нм до 150 нм. Предполагается, что причиной формирования бимодальной зеренной структуры при облучении SiC-керамики импульсным электронным пучком являются термомеханические напряжения, вызванные скоротечностью и, следовательно, неравновесностью процессов преобразования структуры поверхностного слоя материала.

Формирование нанокристаллической структуры при обработке SiC-керамики импульсным электронным пучком сопровождается изменением механических свойств поверхностного слоя материала. Обнаружено увеличение твердости поверхностного слоя на 12 % и модуля Юнга на 17 %.

Предполагается, что причиной роста твердости поверхностного слоя керамики является наноструктурирование материала, а также существенное увеличение содержания в поверхностном слое политипа 15R-SiC, который из всех политипных фаз обладает самыми высокими значениями твердости.



*Рис. 1. Структура поверхности SiC-керамики, сформировавшаяся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком*

**Выводы.** В настоящей работе показано, что облучение SiC-керамики интенсивным импульсным электронным пучком (18 кэВ, 20 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) приводит к изменению фазового состава (двукратное увеличение содержания политипа SiC-15R) и к увеличению механических свойств поверхностного слоя (увеличение твердости и модуля Юнга на 12 % и 17 %, соответственно).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
2. Иванов Ю.Ф. и др. Структура и свойства поверхностного слоя керамики В<sub>4</sub>С, обработанной интенсивным электронным пучком // Физика и химия обработки материалов. – 2017. – № 3. – С. 38–44.
3. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия Вузов. Физика. – 2008. – Т. 51., № 5. – С. 60–70.
4. Leonov A.A., et al. (2018). Structure and properties of the surface layer of «Ti/SiC-ceramic» system irradiated by low-energy pulsed electron beam. J. Phys.: Conf. Ser. V. 1115. Article 032040.
5. Ivanov Y. (2018). Multilevel hierarchical structure formed in the film (Ti)/substrate (SiC-ceramics) system under irradiation by an intense pulsed electron beam. AIP Conference Proceedings. V. 2051. Article 020110.