

УДК 620.178.152.32

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНОВ He И Kr**

Лапицкая В.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Холод В.М.³, Гринчук П.С.¹, Углов В.В.³, Чижик С.А.^{1,2}

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

³Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом наноиндентирования проведены исследования физико-механических свойств фаз SiC и Si образцов карбидокремниевой керамики до и после воздействия ионами гелия (He) и криптона (Kr). Облучение проводилось при интегральных дозировках He от $1 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{17}$ см⁻² и криптона – от $1 \cdot 10^{13}$ до $5 \cdot 10^{15}$ см⁻². Установлено, что модуль упругости E и микротвердость H фазы SiC керамики после воздействия излучения He и Kr снижаются относительно значений $E = 366 \pm 4$ ГПа и $H = 47,2 \pm 0,4$ ГПа исходного образца. Модуль упругости уменьшается с увеличением дозы He до 249 ± 3 ГПа и с увеличением дозы Kr – до 274 ± 3 ГПа. При максимальных дозах He и Kr микротвердость SiC и Si снижается.

Ключевые слова: керамика Si-SiC, ионы, излучение, физико-механические свойства, наноиндентирование.

**PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SILICON CARBIDE CERAMICS UNDER THE
INFLUENCE OF He AND Kr IONS**

Lapitskaya V.^{1,2}, Khabarava A.¹, Kholad V.M.³, Grinchuk P.S.¹, Uglov V.V.³, Chizhik S.^{1,2}

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

³Belarus State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The physical and mechanical properties of the SiC and Si phases of silicon carbide ceramic samples before and after exposure to helium (He) and krypton (Kr) ions were studied by nanoindentation. Irradiation was carried out at integral dosages of He from $1 \cdot 10^{14}$ to $2 \cdot 10^{17}$ cm⁻² and krypton – from $1 \cdot 10^{13}$ to $5 \cdot 10^{15}$ cm⁻². It has been established that the elastic modulus E and microhardness H of the SiC ceramic phase after exposure to He and Kr radiation decrease relative to the values of $E = 366 \pm 4$ GPa and $H = 47.2 \pm 0.4$ GPa of the original sample. The elastic modulus decreases with increasing He dose to 24 ± 3 GPa and with increasing Kr dose – to 274 ± 3 GPa. At maximum doses of He and Kr, the microhardness of SiC and Si decreases.

Key words: Si-SiC ceramics, ions, radiation, physical and mechanical properties, nanoindentation.

Адрес для переписки: Лапицкая В.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Введение. Карбид кремния (SiC) благодаря одновременному сочетанию высоких физико-механических и электропроводящих свойств [1–4], низкой теплопроводности, отличной износо- и коррозионной стойкости [2; 4], устойчивости к радиационному воздействию [5] является наиболее перспективным и предпочтительным материалом в космической отрасли и ядерной энергетике [6]. Способность выдерживать экстремальные ядерные условия привела к исследованию SiC как подходящего кандидата для реакторов и термоядерного синтеза. Однако, воздействие ионизирующего излучения может приводить к ухудшению механических и термических свойств, геометрии керамических материалов [5], что в результате может приводить к разрушениям. Целью работы является исследование влияния интегральной дозы излучения гелия и криптона на физико-механические свойства фаз (SiC и Si) карбидокремниевой керамики.

Материалы и методы. Образцы из карбидокремниевой керамики изготавливались методом реакционного спекания [7] в вакуумной печи при

следующих условиях: температура 1800 °С, абсолютное давление 0,13 Па, выдержка 2 ч. Затем заготовки проходили процесс силицирования, при котором в результате химической реакции кремния, присутствовавшего в избытке, с углеродом в порах каждой заготовки образовывался вторичный карбид кремния, связывающего частицы SiC исходного материала. Конечные образцы керамики содержали 93 об. % SiC и 5 об. % Si. Облучение ионами гелия (He) и криптона (Kr) проводилось при комнатной температуре. Энергия ионов He = 40 кэВ, Kr = 280 кэВ. Облучение проводилось на линейном ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60. Интегральные дозы гелия: $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$, $1 \cdot 10^{16}$, $5 \cdot 10^{16}$ и $2 \cdot 10^{17}$ см⁻², а криптона – $1 \cdot 10^{13}$, $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ и $5 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Физико-механические свойства (модуль упругости E и микротвердость H) определялись на наноинденторе 750 Ubi (Hysitron, США). Исследования проводились при нагрузке 5 мН. Модуль упругости исследуемого материала E пересчитывался по формуле (1) из полученных значений эффективного модуля упругости E_{eff} на наноинденторе [8]:

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_0^2}{E_0}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона исследуемого материала (для SiC $\nu = 0,18$, для Si $\nu = 0,22$) [9]; E_0 и ν_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона индентора (1140 ГПа и 0,07 соответственно).

Результаты. В результате облучения ионами He и Kr установлено, что значения модуля упругости (таблица 1) на фазе SiC уменьшаются с увеличением дозы облучения с 366±4 ГПа до 249±3 ГПа при воздействии He и с 366 ±4 ГПа до 274±3 ГПа при воздействии Kr, а на фазе Si – уменьшается с 181±3 ГПа до 149±3 ГПа при дозе He = 1·10¹⁴ см⁻², а затем происходит возрастание до 156±1 ГПа при дозе He = 5·10¹⁶ см⁻². При дозе He = 2·10¹⁷ см⁻² модуль упругости Si уменьшается до 154±2 ГПа. При воздействии ионами Kr происходит аналогичное изменение модуля упругости для фазы Si как и при воздействии ионов He.

Таблица 1. Физико-механические свойства фаз SiC и Si в зависимости от интегральной дозы излучения гелия и криптона

Интегральная доза излучения, см ⁻²	Фаза SiC		Фаза Si		
	<i>E</i> , ГПа	<i>H</i> , ГПа	<i>E</i> , ГПа	<i>H</i> , ГПа	
He	0	366±4	47,2±0,4	181±3	18,2±0,1
	1·10 ¹⁴	354±1	49,2±0,3	149±3	13,5±0,1
	1·10 ¹⁵	341±3	49,1±1,4	152±1	13,7±0,1
	1·10 ¹⁶	342±3	52,5±0,6	151±2	14,1±0,2
	5·10 ¹⁶	271±3	30,2±0,3	156±1	14,1±0,1
	2·10 ¹⁷	249±3	25,2±0,4	154±2	14,1±0,2
Kr	0	366±4	47,2±0,4	181±3	18,2±0,1
	1·10 ¹³	394±5	56,7±3,5	155±3	13,5±0,1
	1·10 ¹⁴	367±6	53,7±1,3	158±2	13,5±0,1
	1·10 ¹⁵	284±1	30,0±0,3	168±5	12,1±0,1
	5·10 ¹⁵	274±3	29,1±0,6	160±5	12,2±0,1

Микротвердость *H* возрастает на фазе SiC после облучения He при дозах 1·10¹⁴–1·10¹⁶ см⁻², а при дальнейшем увеличении дозы значения микротвердости уменьшаются. На фазе Si происходит сначала снижение *H* (при 1·10¹⁴–1·10¹⁶ см⁻²), а затем увеличение. Ионы Kr приводят к снижению *H* для фазы Si. Микротвердость фазы SiC после воздействия Kr в дозах от 1·10¹³ до 1·10¹⁵ см⁻² возрастает с 47,2±0,4 до 56,7±3,5 ГПа, а при

дальнейшем увеличении дозировки – уменьшается до 29,1±0,6 ГПа.

Закключение. Методом наноиндентирования проведены исследования физико-механических свойств фаз SiC и Si образцов карбидокремниевой керамики до и после воздействия ионами гелия и криптона. Модуль упругости *E* и микротвердость *H* фазы SiC керамики после воздействия излучения He и Kr снижаются относительно значений *E* = 366±4 ГПа и *H* = 47,2±0,4 ГПа исходного образца. Модуль упругости уменьшается с увеличением дозы He до 249±3 ГПа и с увеличением дозы Kr – до 274±3 ГПа. При максимальных дозах He и Kr микротвердость SiC и Si снижается. На фазе Si происходит сначала снижение *H* (при 1·10¹⁴–1·10¹⁶ см⁻²), а затем увеличение. Ионы Kr приводят к снижению *H* для фазы Si.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке ГПНИ, задание Энергетические и ядерные процессы и технологии 2.3.

Литература

1. Lim, K.Y. Mechanical properties of electrically conductive silicon carbide ceramics / K.Y. Lim, Y.-W. Kim, K.J. Kim / Ceramics International. – 2014. – Vol. 40. – P. 10577–10582.
2. Kima, Y.-W. Effects of carbon and silicon on electrical, thermal, and mechanical properties of porous silicon carbide ceramics / Y.-W. Kim, I.-H. Song, K.J. Kim // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46. – P. 15594–15603.
3. Characterization of hardness, elastic modulus and fracture toughness of RB-SiC ceramics at elevated temperature by Vickers test / X. Rao [et al.] // Materials Science & Engineering A. – 2019. – Vol. 744. – P. 426–435.
4. Material removal mode and friction behaviour of RB-SiC ceramics during scratching at elevated temperatures / X. Rao [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – Vol. 39. – P. 3534–3545.
5. Helium irradiation induced microstructural damages and mechanical response of Al₂O₃-ZrO₂-SiC composites / Y. Zhu [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2023. – V. 43, is. 8. – P. 3475–3485.
6. Characterization of thermal sprayed Si on sintered SiC for space optical applications / T.D.P.V. Jalluri [et al.] // Surface Engineering. – 2021. – Vol. 37. – P. 558–571.
7. Advanced technology for fabrication of reaction-bonded SiC with controlled composition and properties / P.S. Grinchuk [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41. – P. 5813–5824.
8. Oliver, W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7. – P. 1564–1583.
9. Determination of Elastic Modulus of SiC-Based Composite Ceramics / M.V. Kiyashko [et al.] // Technical Physics Letters. – 2021. – Vol. 47. – P. 150–153.