

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
НА ОСНОВЕ ZrB<sub>2</sub>-SiC-ZrO<sub>2</sub>**

А.Г. Бурлаченко<sup>1</sup>, Ю.А. Мировой<sup>1,2</sup>, Е.С. Дедова<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: профессор, д.т.н. С.П. Буякова

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/4, 634055

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, Ленина, 30, 634050

e-mail: [burlachenkoag8@gmail.com](mailto:burlachenkoag8@gmail.com)

**HIGH TEMPERATURE TESTS OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON ZrB<sub>2</sub>-SiC-ZrO<sub>2</sub>**

A.G. Burlachenko<sup>1</sup>, Yu.A. Mirovoy<sup>1,2</sup>, Ye.S. Dedova<sup>1,2</sup>

Scientific Supervisor: Prof., Dr. S.P. Buyakova

<sup>1</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634055,

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

e-mail: [burlachenkoag8@gmail.com](mailto:burlachenkoag8@gmail.com)

***Abstract.** In this paper, we studied the effect of the impact of a hypersonic high-enthalpy oxygen-containing plasma stream with a pressure of 100 Mbar and a temperature of up to 2900 °C, on the structural changes in the frontal surface of the samples.*

**Введение.** В данной работе представлены данные о структуре и свойствах теплозащитного слоистого керамического композиционного материала с высокой эрозионной устойчивостью, в кислородсодержащей атмосфере и низкой теплопроводностью. Структура материала выстроена по принципу уменьшения теплопроводности от фронтальной к тыльной поверхности, что призвано обеспечить высокую теплоизоляцию при эксплуатации в условиях экстремальных температур. В настоящее время, основой высокотемпературных керамик является соединение ZrB<sub>2</sub>-SiC, благодаря низкому удельному весу и высокой термостойкости, свыше 2000 °C [1, 2]. Керамика на основе ZrB<sub>2</sub>-SiC обладает в значительной мере более высокой стойкостью к высокотемпературному окислению, чем ее компоненты. Процесс окисления ZrB<sub>2</sub>-SiC происходит в две стадии: при температуре 1200 °C, когда окисление диборида циркония происходит с образованием ZrO<sub>2</sub> и жидкого оксида бора, и при более высоких температурах (1600 °C), когда начинается активное окисление карбида кремния с образованием оксида SiO<sub>2</sub>, который препятствует испарению B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, связывая его в боросиликатное стекло. Варьирование содержания SiC позволяет управлять процессами залечивания поверхности композита, а добавление в состав материала слоёв, содержащих ZrO<sub>2</sub> приводит к снижению теплопроводности. Сочетание высокотемпературной устойчивости и аномально низкой теплопроводности в составе одного слоистого композиционного материала, делает его весьма привлекательным в области авиации и космонавтики [3, 4].

**Экспериментальная часть.** Для структурно-исследовательских испытаний было изготовлено девять лабораторных образцов из теплозащитного слоистого керамического материала системы ZrB<sub>2</sub>-

SiC-ZrO<sub>2</sub> с термостойким покрытием HfC. Образцы отличались друг от друга количеством и толщиной промежуточных слоев, соотношением компонентов ZrB<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SiC, а также толщиной покрытия HfC.

Был проведен рентгенофазовый анализ поверхности образцов системы ZrB<sub>2</sub>-SiC-ZrO<sub>2</sub> с термостойким покрытием HfC. На рисунке 1 представлены дифрактограммы, снятые с фронтальной поверхности лабораторных образцов теплозащитного слоистого керамического материала системы ZrB<sub>2</sub>-SiC-ZrO<sub>2</sub> с термостойким покрытием HfC до и после высокотемпературных воздействий.

Съемку дифрактограмм проводили в фильтрованном K<sub>α</sub> Cu – излучении с шагом 0.05 град, экспозицией в каждой точке – 5 сек.

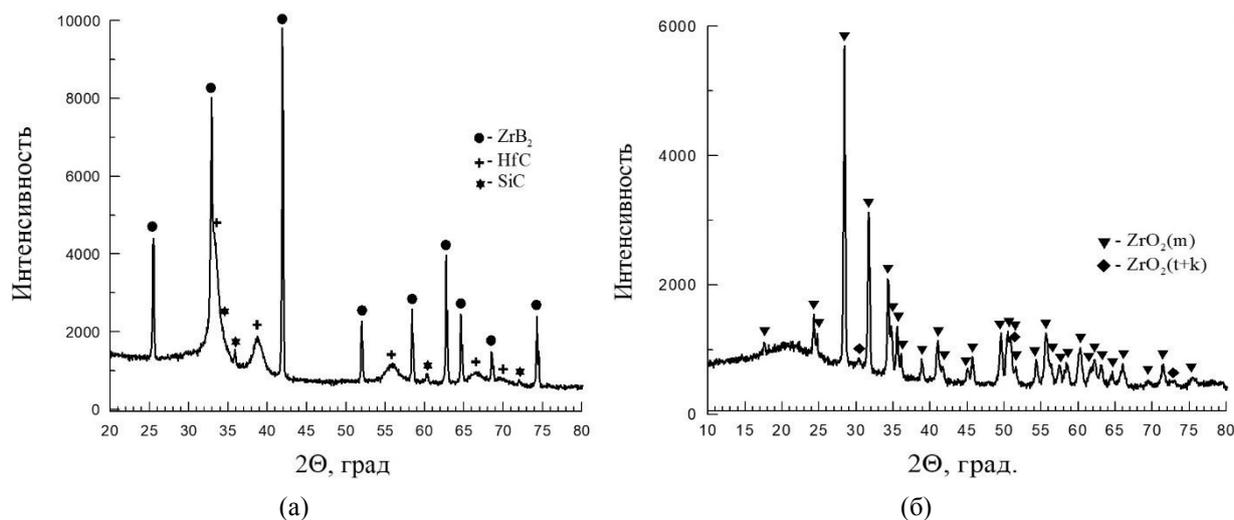


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы фронтальной поверхности лабораторных образцов теплозащитного слоистого керамического материала системы ZrB<sub>2</sub>-SiC-ZrO<sub>2</sub> до (а) и после (б) высокотемпературных воздействий

Фазовый анализ дифрактограмм исходных образцов показал, что на дифрактограммах наблюдаются дифракционные максимумы, принадлежащие дибориду циркония. Кроме того, на дифрактограммах наблюдаются пики малой интенсивности, принадлежащие карбиду кремния. Карбид гафния (HfC) на рентгеновских дифрактограммах представлен широкими дифракционными максимумами, что может свидетельствовать о наноструктурном состоянии покрытия. На некоторых дифрактограммах исходных образцов дифракционных максимумов, принадлежащих HfC не наблюдается. Вероятно, толщина покрытия образцов не превышает 0.5 - 1 мкм.

На дифрактограммах образцов после высокотемпературных воздействий видно, что на поверхности всех образцов после абляции присутствует диоксид циркония моноклинной модификации. Кроме того, на дифрактограммах в области малых углов наблюдается широкий дифракционный максимум, свидетельствующий о наличии на поверхности образцов рентгеноаморфной фазы.

Появление рентгеноаморфной фазы на поверхности лабораторных образцов после абляции вероятно связано реакцией взаимодействия диборида циркония и карбида кремния при температуре выше 1000 °C приводящей к образованию боросиликатного стекла, создающего диффузионный барьер для газов-окислителей.

На рисунках 2 показаны РЭМ изображения образца после высокотемпературных эрозионных воздействий. На поверхности образца наблюдается оплавленный слой с небольшими кратерами.

Вероятно, кратеры образовались в результате расплавления и испарения  $V_2O_5$  с поверхности композита во время обдува образца горячими газами.

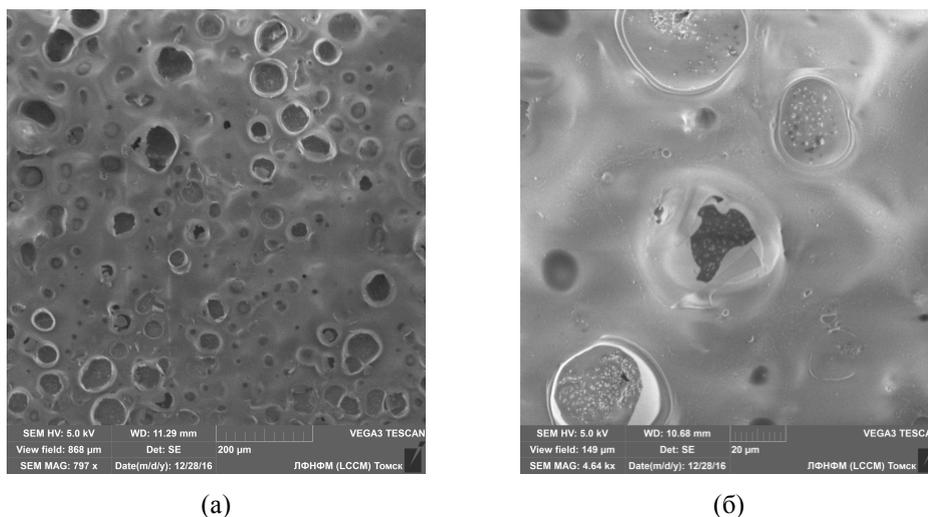


Рис. 2. РЭМ изображение образца после высокотемпературных воздействий

**Результаты.** После высокотемпературных испытаний образцов системы  $ZrB_2-SiC-ZrO_2$  с термостойким покрытием  $HfC$  на поверхности не произошло катастрофического разрушения ни одного из образцов. На поверхности подвергнутой абляции не наблюдается трещин и расслаивания. Поверхностный слой образован преимущественно стеклоподобной фазой с частицами диоксида циркония, образовавшихся в результате термоокислительных реакций с кислородом, присутствующим в высокотемпературной плазме.

Выполненные исследования подтверждают перспективность полученных теплозащитных пористых градиентных керамических материалов системы  $ZrB_2-SiC-ZrO_2$  с термостойким покрытием при использовании их в качестве элементов тепловой защиты в условиях нагрева в потоке диссоциированного воздуха при сверхвысоких температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ Соглашение № 14.584.21.0026 (RFMEFI58417X0026).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войнич Е. В., Фролов Г. А., Цыганенко В. С. Кварцевая стеклокерамика для тепловой защиты и высокотемпературных технологий //Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №. 8. – С. 24–28.
2. Григорьев, О.Н. Ультравысокотемпературная керамика для авиационно-космической техники //Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8 (95). –С.119-128.
3. Келина И. Ю. и др. Состояние и перспективы разработки ультравысокотемпературных керамических материалов для применения в гиперзвуковых авиакосмических объектах //Авиационная промышленность. – 2011. – №. 1. – С. 9-9.
4. Wuchina E. et al. UHTCs: ultra-high temperature ceramic materials for extreme environment applications //The Electrochemical Society Interface. – 2007. – Т. 16. – №. 4. – С. 30.