

3. W. Kleemann, V.V. Shvartsman, P. Borisov, A. Kania. // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 105. – P. 202-257.
4. I. Gruszka, A. Kania, E. Talik, M. Szubka, S. Miga, J. Klimontko, J. Suchanicz. Characterization of multiferroic  $\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$  and  $\text{PbFe}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$  ceramics derived from citrate polymeric Precursors // J.American Ceramic Society. – 2018. – 15998 (DOI: 10.1111/jace.15998).
5. R. Ramesh and N.A. Spaldin. Multiferroics: progress and prospects in thin film // Nature Materials. 2007. V. 6. PP. 21.
6. Koji Kimura, Kohei Yokochi, Rikuya Kondo, Daisuke Urushihara, Yuta Yamamoto, Artoni Kevin R. Ang, Naohisa Happo, Koji Ohara, Tomohiro Matsushita, Toru Asaka, Makoto Iwata, and Kouichi Hayashi. Local structural analysis of  $\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$  multiferroic material using X-ray fluorescence holography // Japanese Journal of Applied Physics. – 2019. – V. 58. – 100601.
7. D. Bochenek, P. Kruk, R. Skulski, P. Wawrzęła. Multiferroic ceramics  $\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$  doped by Li. // J. Electroceram. – 2011. – V. 26. – P. 8-13.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЛОИСТОГО МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА $\text{Ti}/(\text{ZrB}_2\text{-SiC})$

<sup>1</sup>Е.В. ДЕГТЯРЕВА, <sup>1</sup>О.Ю. ВАУЛИНА, <sup>1,2</sup>Е.С. ДЕДОВА, <sup>1,2,3</sup>С.П. БУЯКОВА

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

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: [evd13@tpu.ru](mailto:evd13@tpu.ru)

Разработка слоистых металлокерамических материалов с принципиально новым комплексом свойств имеет важное значение для таких отраслей современной промышленности, как станкостроение, машиностроение, авиастроение. Слоистые металлокерамические материалы характеризуются резким изменением физических, механических, химических свойств в объеме материала, что определяет их функциональные характеристики. Чередование слоев из металла и керамики позволяет добиться в таких материалах термомеханической стабильности и, что немаловажно, устойчивости к термоударным воздействиям. В этой связи особый интерес представляют слоистые металлокерамические композиты  $\text{Ti}/(\text{ZrB}_2\text{-SiC})$ . Керамика  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$  идеально подходит для высокотемпературных применений. Однако эти материалы могут подвергаться разрушению в результате резких изменений температурного поля. Использование концепции слоистых материалов при изготовлении керамических композитов дает новый подход к улучшению их термических и механических свойств.

Целью настоящей работы явилось изучение структуры функционального слоистого композита  $\text{Ti}/(\text{ZrB}_2\text{-SiC})$ .

Образцы слоистого композита, рисунок 1а, получены горячим прессованием в течение 15 минут при температуре 1300 °С и давлении 35 МПа в атмосфере аргона пластин керамики  $\text{ZrB}_2$  – 15 об.% SiC и титана марки ВТ1-00. Материалом для исследований выступил функционально-градиентный композиционный материал на основе диборида циркония на титановой подложке. Изучение микроструктуры осуществлялось на растровом электронном микроскопе Vega Tescan 3. EDS-анализ проводился с помощью безазотного ADD детектора Inca x-ACT. Рентгеновские исследования проводились на дифрактометре XRD-7000S Shimadzu с  $\text{CuK}\alpha$  излучением в угловом диапазоне от 10 до 120 °.

На рисунке 1а представлена микроструктура поперечного сечения слоистого композиционного материала  $\text{Ti}/(\text{ZrB}_2\text{-SiC})$ . Видно, что при взаимодействии титановой и керамической пластин сформировалась довольно сложная градиентная структура, в которой

выделяются пять областей, отличающихся количественным элементным составом и пористостью. Трещины на межслойных границах не наблюдались, что может свидетельствовать о хорошей адгезии между керамикой и титаном.

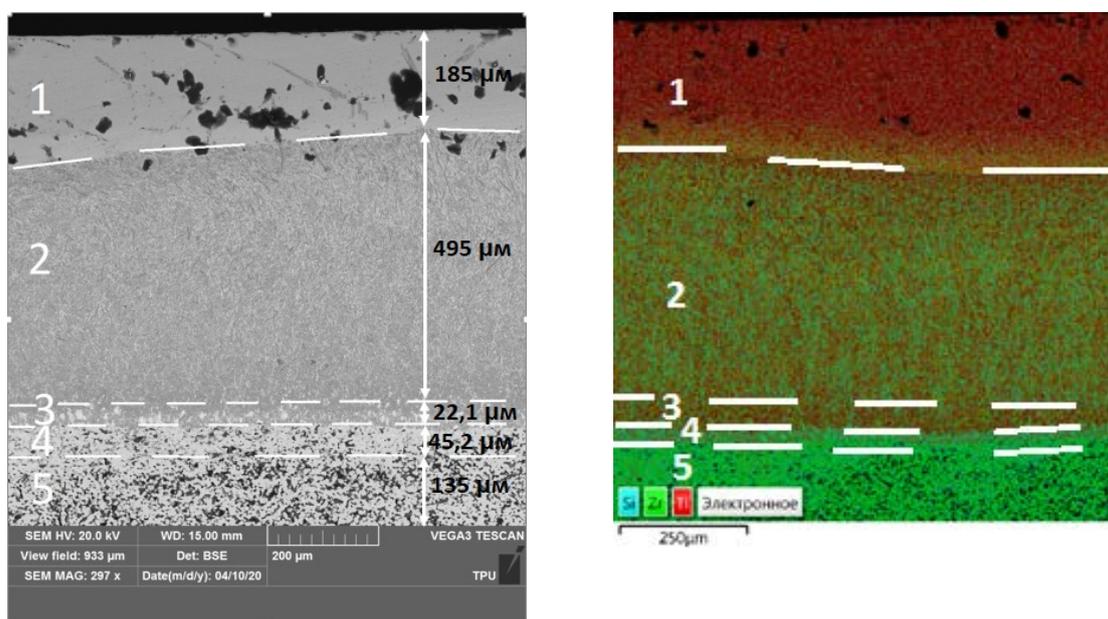


Рисунок 1 – Слоистый материал Ti/(ZrB<sub>2</sub>-SiC): а) микроструктура, б) EDS анализ

Согласно проведенному EDS-анализу, рисунок 1б, верхний слой является монофазным титаном. Присутствие атомов углерода связано с предварительным насыщением образца углеродом. Второй и третий слои состоят из титана, циркония и бора. Содержание атомов титана уменьшалось по мере приближения к керамическому слою. В таблице 1 приведено количественное содержание элементов в композите Ti/(ZrB<sub>2</sub>-SiC).

Таблица 1 - Количественное содержание элементов в композите Ti/(ZrB<sub>2</sub>-SiC)

| Слой | Название элемента |           |            |            |           |
|------|-------------------|-----------|------------|------------|-----------|
|      | Zr, ат., %        | B, ат., % | Si, ат., % | Ti, ат., % | C, ат., % |
| № 1  | -                 | -         | -          | 86,77      | 13,23     |
| № 2  | 5,7               | 33,09     | 1,44       | 41,6       | 18,17     |
| № 3  | 15,44             | 21,52     | 8,14       | 22,39      | 32,52     |
| № 4  | 16,00             | 58,17     | 0,29       | 0,66       | 24,88     |
| № 5  | 9,72              | 40,46     | 0,44       | 0,1        | 49,28     |

Рентгеновские исследования показали, что фазовый состав первого слоя был представлен гексагональной фазой титана. Переходная область со второго по четвертый слой состояла из гексагональных модификаций ZrB<sub>2</sub>, SiC, Ti и Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>. Фазовый состав пятого слоя был представлен фазами ZrB<sub>2</sub> и SiC.

*Работа проводилась в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований Государственных академий наук на 2013-2020 годы (программа III.23.2.3).*