

УДК 621.3.032.21

А. П. КИСЛИЦЫН, А. А. ТАРАН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
80мас.%BaZrO<sub>3</sub> – 20мас.% W ПРИ НАНЕСЕНИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

*Представлены результаты исследований структур, которые появляются на поверхности композиционного прессованного материала 80 мас. % BaZrO<sub>3</sub> – 20 мас. % W в процессе высокотемпературной обработки материала при нанесении на его поверхность Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установлено, что в области напыления оксида алюминия формируются крупные кристаллы алюмината бария. На поверхности, куда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> доставляется диффузионным образом, и которая подвергалась дополнительному воздействию импульсных электромагнитных полей высокой напряженности, формируются рыхлые островковые образования алюмината бария. Формирование островков идет на кристаллах цирконата бария и оксида бария. В объеме композита алюминий не обнаруживается.*

**Ключевые слова:** цирконат бария, оксид алюминия, алюминат бария, напыление, высокотемпературная обработка, структура поверхности.

**1. Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами, обзор публикаций и анализ нерешенных проблем**

В авиационно-космической технике и современных технологиях существует постоянный интерес к термоэммитерам, которые, создавая первичные потоки электронов, используются в составе электрореактивных двигателей, плазмотронов и других электровакуумных и газоразрядных устройств авиационно-космической техники. От термоэммитеров требуется не только обеспечение больших плотностей потоков электронов (плотность тока эмиссии ~ 100 А/см<sup>2</sup> и выше), но они должны еще обладать высокой стойкостью к отравляющим действиям окружающей газовой атмосферы [1].

В связи с этим возрастает интерес к материалам на основе циркония и его соединений [2 – 4], рассматриваемых в качестве термохимических катодов и предполагающих их использование в окружении кислородсодержащих газов. В настоящее время циркониевые и гафниевые вставки как эмиттеры уже используются в плазмотронах, что позволило увеличить срок службы катодов до приемлемых значений 100 – 200 часов.

Следует заметить, что чистый цирконий обладает достаточно высокой работой выхода ( $\phi = 3,9$  эВ [5]). Для его соединений данные по работе выхода оказываются достаточно противоречивые [5 – 7], что обусловлено высокой чувствительностью состава и структуры соединений к условиям измерений.

Однако, соединения и сплавы циркония обладают лучшими по сравнению с чистым цирконием эмиссионными свойствами, и могут представлять интерес для исследования их структуры и свойств с перспективой использования в качестве термохимических катодов.

Рассматривая возможное влияние алюминия на цирконат бария BaZrO<sub>3</sub>, который из исследованных материалов обладает более высокой эмиссионной способностью, необходимо отметить, что алюминаты бария обладают еще более высокой эмиссионной способностью по сравнению с цирконатом бария [5]. Наряду с этим известно, что в системе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – ZrO<sub>2</sub> нет химических соединений, и диаграмма состояния для этой системы, построенная по результатам исследований, выполненных методом высокотемпературной термографии [8], имеет эвтектический вид с эвтектикой (40±1) мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и температурой плавления ~ 2140 К. С другой стороны, в системе Zr – Al известно десять интерметаллических соединений [9], а в процессе горячего прессования ZrO<sub>2</sub> с Al было установлено взаимодействие между компонентами с образованием Al<sub>2</sub>Zr [10].

Информация о взаимодействии алюминия с цирконатом бария в литературных источниках отсутствует, как и отсутствует информация об эмиссионных свойствах системы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – BaZrO<sub>3</sub> – W.

Из сказанного следует, что исследование композиционных материалов в системе BaZrO<sub>3</sub> – W – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для эмиссионной электроники и материаловедения представляет заметный интерес.

## 2. Цель исследований

Учитывая изложенное выше, целью работы было исследование изменений структуры и состава прессованного композиционного материала 80 мас. %  $BaZrO_3$  – 20 мас. %  $W$ , происходящие в результате нанесения на его поверхность термически распыляемого  $Al_2O_3$ .

## 3. Результаты исследований

Образцы прессованного композиционного материала 80 мас. %  $BaZrO_3$  – 20 мас. %  $W$  были изготовлены аналогично [2]. Нанесение  $Al_2O_3$  осуществлялось на боковую поверхность образца путем испарения корундового порошка из термического испарителя, изготовленного из фольги сплава МР-47 (рис. 1). В последующем напыленный материал доставлялся на рабочую (эмитирующую) поверхность за счет диффузионных процессов.

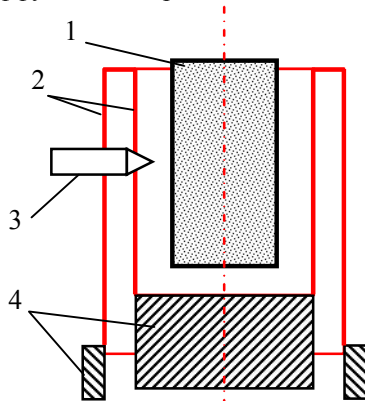


Рис. 1. Конструктивная схема нагревателя:  
1 – образец; 2 – нагревательные элементы печи;  
3 – испаритель с порошком корунда;  
4 – токоподводы печи

Исследования структуры и элементного состава образцов осуществлялось при помощи растрового электронного микроскопа РЭМ-106 с рентгеновским энергодисперсионным микроанализатором ЭДАР. Изображение рабочей поверхности образца в отраженных электронах перед исследованиями представлено на рис. 2. Оно вместе с результатами проведенного анализа элементного состава (табл. 1) свидетельствует о том, что поверхность имеет характерную зернистую структуру, в которой можно выделить светлые зерна (область 1) – зерна вольфрама со следами циркония на поверхности, и серые зерна (область 2) – смесь  $BaZrO_3$  и  $BaO$ .

Наличие циркония на поверхности вольфрама и  $BaO$  в области кристаллов цирконата бария, по-видимому, связано с тем, что в процессе высокотемпературного спекания образцов, осуществляемо-

го после их прессования, часть цирконата бария диссоциирует с освобождением циркония, который адсорбируется на поверхности вольфрама.

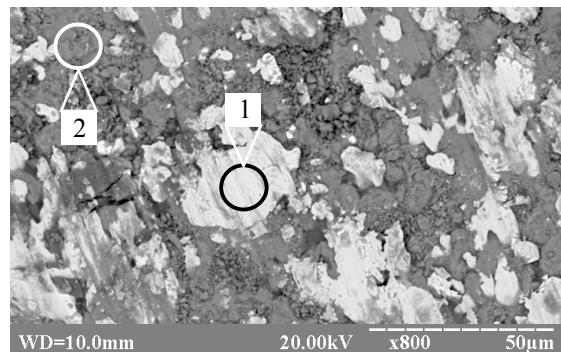


Рис. 2. Электронномикроскопическое изображение рабочей поверхности образца перед испытаниями. Цифрами отмечены области контроля состава

Таблица 1  
Элементный состав приповерхностного слоя образца перед испытаниями

	Содержание в мас.%		
	Средний	Обл. 1	Обл. 2
<b>Zr</b>	18,26	0,98	26,63
<b>Ba</b>	25,43	0	50,60
<b>O</b>	26,48	0	19,97
<b>W</b>	28,95	99,02	2,45
<b>Al</b>	0,88	0	0,37

После обезгаживания образца, проведенного при температуре 1400 К, осуществлялась его высокотемпературная обработка при максимальной температуре 1930 К в течение 20 ч с одновременной работой испарителя и нанесением на боковую поверхность  $Al_2O_3$ . Результаты изменения структуры эмитирующей поверхности представлены на рис. 3, а элементный состав отдельных областей поверхности, отмеченных на рисунке, приведен в табл. 2.

В электронномикроскопическом изображении эмитирующей поверхности (отраженные электроны), представленной на рис. 3, обращает на себя внимание наличие на поверхности островков рыхлой рельефной пленки (область 3), которая частично покрывает кристаллы цирконата и оксида бария и «наполняет» на кристаллы вольфрама (область 1). Пленка представляет собой, главным образом, алюминат бария  $BaAl_2O_4$  с незначительным содержанием цирконата бария и оксида циркония, которые, вполне вероятно, располагаются под пленкой, если ее толщина не превышает ~ 1 мкм. Пленка рыхлая, аморфная, в ней отсутствуют сквозные поры, что должно будет определенным образом отразиться на

диффузионной доставке бария к эмитирующей поверхности и, соответственно, повлиять на эмиссионные свойства образца.

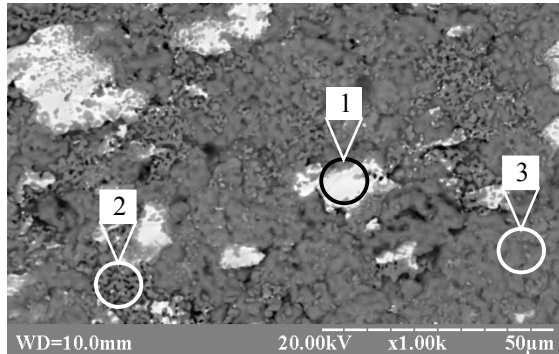


Рис. 3. Электронномикроскопическое изображение рабочей поверхности образца после испытаний.

Цифрами отмечены области контроля состава

Таблица 2

Элементный состав приповерхностного слоя образца после испытаний

Содержание в масс. %				
	Средний	Обл. 1	Обл. 2	Обл. 3
<b>Zr</b>	22,60	0	46,65	7,81
<b>Ba</b>	16,91	0,91	1,59	39,56
<b>O</b>	35,75	0	46,05	34,45
<b>W</b>	21,22	98,80	5,24	3,42
<b>Al</b>	3,52	0,29	0,47	14,76

Кроме того, после высокотемпературных испытаний на поверхности зерен вольфрама (область 1) пленка циркония не наблюдается, что, скорее всего, связано с достаточно интенсивной десорбцией циркония при  $T > 1700 \text{ K}$  [11]. В то же время, на поверхности зерен вольфрама после испытаний наблюдается как Ba, так и BaO, что объясняется достаточно сильными адсорбционными связями бария с вольфрамом: энергия десорбции бария с поверхности вольфрама составляет  $\sim 4 \text{ эВ}$  [12].

С целью проверки проникновения напыляемого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  во внутренние области прессованного композиционного материала был сделан скол образца параллельный его рабочей поверхности и проходящий через область напыления  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Электронномикроскопическое изображение скола (в отраженных электронах) представлено на рис. 4. В правой части изображения хорошо виден темно-серый «поясок» продуктов напыления, а на остальной части наблюдается зернистая структура самого образца  $80\% \text{ BaZrO}_3 - 20\% \text{ W}$  (по массе). Результаты анализа элементного состава в областях, отмеченных на рис. 4, приведены в табл. 3.

Толщина «пояска», который согласно анализу представляет собой алюминий и алюминат бария с нарушенной стехиометрией по кислороду, составля-

ет (20...30) мкм. Слой представляет собой крупные пористые кристаллы (область 3), которые имеют размеры заметно большие по сравнению с размерами зерен вольфрама (область 1) и цирконата бария (область 2).

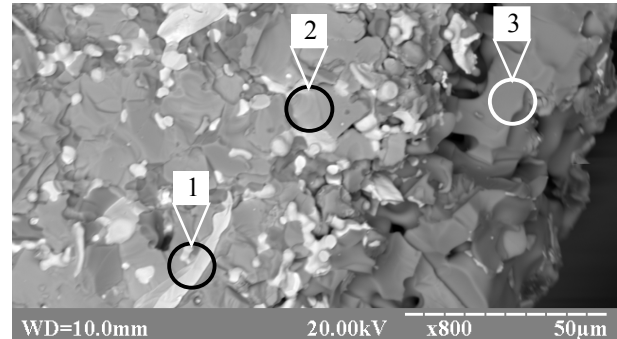


Рис. 4. Электронномикроскопическое изображение участка скола образца после испытаний.

Цифрами отмечены области контроля состава

Таблица 3

Элементный состав скола образца после испытаний

Содержание в масс. %			
	Обл. 1	Обл. 2	Обл. 3
<b>Zr</b>	2,62	37,94	0
<b>Ba</b>	2,18	50,28	63,76
<b>O</b>	0	9,14	4,80
<b>W</b>	85,63	2,38	0,10
<b>Fe</b>	0,53	0,26	0,53
<b>Al</b>	0	0	30,81
<b>Ta</b>	9,04	0	0

В зернах цирконата бария нарушена стехиометрия по барию и кислороду. Слой алюмината бария располагается над зернами основного материала  $80 \text{ мас. \% BaZrO}_3 - 20 \text{ мас. \% W}$  и в межзеренное пространство не проникает. Анализ элементного состава внутренней части образца показывает, что алюминий не обнаруживается за пределами напыленного слоя даже в виде следов. Это свидетельствует о малой скорости диффузии алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в зернистой структуре исходного материала, в результате чего взаимодействие оксида алюминия с цирконатом бария происходит, по-видимому, только на поверхности контакта этих фаз (в области напыления и на рабочей поверхности, куда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  доставляется за счет поверхностной диффузии). Наблюдаемые изменения состава и структуры образцов  $80 \text{ мас. \% BaZrO}_3 - 20 \text{ мас. \% W}$  могут свидетельствовать о достаточно высокой инертности Zr и  $\text{ZrO}_2$  по отношению к  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и соединениям алюминия. Такая инертность при высоких температурах отмечена в [13] и используется при создании комбиниро-

ванных термозащитных и термобарьерных покрытий на лопатках турбин газотурбинных двигателей.

Нельзя не отметить еще один факт, установленный в процессе высокотемпературных испытаний, состоящий в том, что в объеме образцов состава 80 мас. %  $\text{BaZrO}_3$  – 20 мас. % W, вблизи зерен вольфрама в малых количествах обнаруживается тантал. Само наличие тантала вполне объяснимо, т.к. нагревательные элементы печи (поз. 2, рис. 1) изготовлены из тантала. Непонятным оказывается то обстоятельство, что в области зерен цирконата и в кристаллах алюмината бария следы тантала не обнаруживаются, что требует дополнительных исследований и анализа.

### Выводы

Изучены структура и состав поверхности прессованного композита 80 мас. %  $\text{BaZrO}_3$  – 20 мас. % W при нанесении на его поверхность путем термического напыления пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Показано, что:

-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , поступающий на рабочую поверхность прессованного композиционного материала 80 мас. %  $\text{BaZrO}_3$  – 20 мас. % W, под действием высоких температур и импульсных электромагнитных полей (при отборе эмиссионных токов с рабочей поверхности) формирует на ней островки рыхлой, аморфной, рельефной пленки алюмината бария ( $\text{BaAl}_2\text{O}_4$ ), которая содержит малое количество  $\text{BaZrO}_3$  и  $\text{ZrO}_2$ ;

- в области поступления термически напыляемого оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) на поверхность материала 80 мас. %  $\text{BaZrO}_3$  – 20 мас. % W формируются компактные крупные кристаллы алюмината бария с нарушенной стехиометрией по кислороду и имеющие развитую систему пор;

- на поверхности зерен вольфрама формирование пленок алюмината бария не наблюдается: пленки формируются на поверхности зерен цирконата бария и оксида циркония, а потом «наползают» на зерна вольфрама;

- алюминий отсутствует в объеме образцов прессованного композиционного материала, что может свидетельствовать не только о химической пассивности во взаимодействиях соединений циркония и алюминия, но и плохой взаимной смачиваемости поверхностей этих соединений и чрезвычайно низкой скорости взаимной диффузии.

Изменения эмиссионных свойств поверхности композита 80 мас. %  $\text{BaZrO}_3$  – 20 мас. % W, обусловленные нанесением на нее оксида алюминия и формированием островков алюмината бария, будут представлены в последующей статье.

Авторы выражают искреннюю **благодарность С. С. Орданьяну** за предоставленные для исследований образцы и **С. Л. Абашину** за помощь в проведении электронно-микроскопических исследований.

### Литература

1. Аишкинази, Л. А. *Материалы электронных эмиттеров. Ч. II. [Текст] : учеб. пособие / Л. А. Аишкинази, В. С. Петров. – М. : Моск. гос. ин-т электроники и математики, 1997. – 68 с.*
2. *Термэмиссионные свойства композиционного материала на основе цирконата бария с вольфрамом [Текст] / А. П. Кислицын, А. А. Таран, С. С. Орданьян, П. А. Комозынский // Вісті академії інженерних наук України. Машинобудування та прогресивні технології. – 2009. – № 1(38). Спец. вип. – С. 220–223.*
3. *Термохимические катоды [Текст] / М. Ф. Жуков, А. В. Пустогаров, Г.-Н. Б. Дандарон, А. Н. Тимошевский. – Новосибирск : Институт теплофизики СО АН СССР, 1985. – 129 с.*
4. *Исследование термохимических катодов в дуговых плазмотронах [Текст] / А. С. Аньшаков, Э. К. Урбах, А. Э. Урбах, В. А. Фалеев // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 4. – С. 685 – 691.*
5. *Фоменко, В. С. Эмиссионные свойства материалов [Текст] : справочник / В. С. Фоменко. – 4-е изд. – К. : Наук. думка, 1981. – 340 с.*
6. *Концентрационная зависимость эмиссионных свойств некоторых тугоплавких соединений и стабильность их эмиссии [Текст] / Л. Г. Бедняк, П. А. Комозынский, В. С. Неишпор и др. // Электронное строение и физико-химические свойства сплавов и соединений на основе переходных металлов : сб. науч. тр. Акад. наук УССР, Ин-т проблем материаловедения – К. : Наук. Думка, 1976. – С. 84 – 89.*
7. *Влияние состояния поверхности на эмиссионные свойства нитрида циркония [Текст] / А. П. Кислицын, А. С. Вандер, И. А. Брытов и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1986. – Вып. 4. – С. 119 – 122.*
8. *Jerebtsov, D. A. Phase diagram of the system:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{ZrO}_2$  [Text] / D. A. Jerebtsov, G. G. Mikhailov, S. V. Sverdina // *Ceramics International*. – 2000. – No. 26. – P. 821-823.*
9. *Хансен, М. Структуры двойных сплавов [Текст] / М. Хансен, К. Адерко. – М. : Металлургия. – 1962. – Т. 1. – 608 с.*
10. *Прокопьев, Н. М. Исследование взаимодействия  $\text{ZrO}_{2(m)}$  и Al в процессе горячего прессования [Текст] / Н. М. Прокопьев, С. И. Джемьялов, О. В. Харченко // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология**

его изготовления и применения. – 2005. – Вып. 8. – С. 266 – 271.

11. Турсунметов, К. А. Исследование термоустойчивости пленок титана, циркония и гафния на поверхности вольфрама [Текст] / К. А. Турсунметов // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т. 20, вып. 19. – С. 71 – 75.

12. Субмонослойные пленки на поверхности металлов [Текст] / Л. А. Большов, А. П. Напартович, А. Г. Наумовец, А. Г. Федорус // УФН. – 1977. – Т. 122, вып. 1(500). – С. 125 – 158.

13. Денисов, П. Ю. Взаимодействие сплавов алюминия с материалом пресс-форм и функциональными покрытиями [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Денисов Павел Юрьевич ; ТюмГНГУ. – Тюмень, 2005. – 16 с.

## References

1. Ashkinazi, L. A., Petrov, V. S. *Materialy jelektronnyh jemitterov. Ch. II.: Ucheb. Posobie* [Materials electron emitters. Part II.: Proc. benefit]. Moscow, Mosk. gos. in-t jelektroniki i matematiki. Publ., 1997. 68 p.

2. Kislicyn, A. P., Taran, A. A., Ordan'jan, S. S., Komozyanskiy, P. A. Termojemissionnye svojstva kompozicionnogo materiala na osnove cirkonata barija s vol'framom [Thermionic properties of composite material based on barium zirconate with tungsten]. *Visti akademiyi inzhenernyx nauk Ukrainy. Mashynobuduvannya ta progresyvni tekhnologiyi - Proceedings of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine. Mechanical engineering and advanced technology*, 2009, no. 1(38), pp. 220–223.

3. Zhukov, M. F., Pustogarov, A. V., Dandaron, G.-N. B., Timoshevskiy, A. N. *Termohimicheskie katody* [Thermochemical cathodes]. Novosibirsk, Institut teplofiziki SO AN SSSR Publ., 1985. 129 p.

4. An'shakov, A. S., Urbah, Je. K., Urbah, A. Je., Faleev, V. A. Issledovanie termohimicheskikh katodov v dugovyh plazmotronah [Thermochemical cathodes in arc plasma torches]. *Teplofizika i ajeromehanika*, 2005, vol. 12, no. 4. pp. 685 – 691.

5. Fomenko, V. S. *Jemissionnye svojstva materialov. Spravochnik 4-e izd* [The emission properties of the materials. Handbook 4th ed.]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 1981. 340 p.

6. Bednjak, L. G. Komozyanskiy, P. A., Neshpor, V. S., Ostrovskiy, E. K. Koncentracionnaja zavisimost' jemissionnyh svojstv nekotoryh tugoplavkih soedinenij i stabil'nost' ih jemissii [The concentration dependence of the emission properties of some refractory compounds, and the stability of their emission]. *Jelektronnoe stroenie i fiziko-himicheskie svojstva splavov i soedinenij na osnove perehodnyh metallov. sb. nauch. tr. Akad. nauk USSR, In-t problem materialovedenija*. Kiev, Nauk. Dumka. Publ., 1976, pp. 84 – 89.

7. Kislicyn, A. P., Vander, A. S., Brytov, I. A., Neshpor, V. S., Ostrovskiy, E. K. Vlijanie sostojanija poverhnosti na jemissionnye svojstva nitrida cirkonija [Influence of surface conditions on the emission properties of zirconium nitride]. *Poverhnost'. Fizika, himija, mehanika*, 1986, vol. 4, pp. 119 – 122.

8. Jerebtsov, D. A., Mikhailov, G. G., Sverdina, S. V. Phase diagram of the system:  $Al_2O_3-ZrO_2$ . *Ceramics International*, 2000, no. 26, pp. 821-823.

9. Hansen, M., Aderko, K. *Struktury dvojnnyh splavov* [Structure of Binary Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1962, vol. 1. 608 p.

10. Prokopiv, N. M., Dzheljalov, S. I., Harchenko, O. V. Issledovanie vzaimodejstvija  $ZrO_{2(m)}$  i Al v processe gorjachego pressovanija [Interaction study  $ZrO_{2(m)}$  and Al in the process of hot pressing]. *Porodorazrushajushhij i metalloobrabatyvajushhij instrument – tehnika i tehnologija ego izgotovlenija i primenenija*, 2005, vol. 8, pp. 266 – 271.

11. Tursunmetov, K. A. Issledovanie termoustojchivosti plenok titana, cirkonija i gafnija na poverhnosti vol'frama [Study the thermal stability of titanium films, zirconium and hafnium to tungsten surface]. *Pis'ma v ZhTF*, 1994, vol. 20, no. 19, pp. 71 – 75.

12. Bol'shov, L. A., Napartovich, A. P., Naumovec, A. G., Fedorus, A. G. Submonoslojnye plenki na poverhnosti metallov [Sub monolayer film on metal surfaces]. *UFN*, 1977. vol. 122, no. 1(500), pp. 125-158.

13. Denisov, P. Ju. *Vzaimodejstvie splavov aljuminija s materialom press-form i funkcional'nymi pokrytijami. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk* [The interaction with the material of aluminum alloy molds and functional coatings. Avtoref. diss. ... cand. eng. sci.]. Tjumen', TjumGNGU Publ., 2005. 16 p.

**ЗМІНА СТРУКТУРИ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ 80 мас.% BaZrO<sub>3</sub> - 20 мас.% W  
ПРИ НАНЕСЕННІ НА ЙОГО ПОВЕРХНЮ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*****О. П. Кислицин, А. О. Таран***

Наведено результати досліджень структур, які з'являються на поверхні композиційного пресованого матеріалу 80 мас. % BaZrO<sub>3</sub> – 20 мас. % W під час високотемпературної обробки матеріалу при нанесенні на його поверхню Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Встановлено, що в області напилення Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> формуються великі кристали алюмінату барію. На поверхні, куди Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> потрапляє завдяки дифузії, та яка зазнає додаткового впливу імпульсних електромагнітних полів високої напруженості, формуються пухкі острівцеві утворення алюмінату барію. Формування острівців йде на кристалах цирконату барію і оксиду барію. В об'ємі композиту алюміній не виявляється.

**Ключові слова:** цирконат барію, оксид алюмінію, алюмінат барію, напилення, високотемпературна обробка, структура поверхні.

**STRUCTURE CHANGE OF 80 % BaZrO<sub>3</sub> - 20 % W COMPOSITION  
MATERIAL AT Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> COATING ON ITS SURFACE*****O. P. Kyslytsyn, A. O. Taran***

Investigation results of structures, which appear on the surface of composition pressed material 80 % BaZrO<sub>3</sub> – 20 % W during high-temperature processing at Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on its surface are presented. It has been found that large crystals of barium aluminate are formed in the area deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Loose islands of barium aluminate are formed on the surface of the composition material. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diffuses to this surface, which undergo additional pulse electromagnetic fields influence. Islands formation takes place on the crystals of barium zirconate and barium oxide. Aluminum is not observed in the interior of composite.

**Key words:** barium zirconate, aluminum oxide, barium aluminate, deposition, high temperature treatment, surface structure.

**Кислицын Александр Петрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: apkyslytsyn@mail.ru.

**Таран Анатолий Алексеевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: anatolytaran49@gmail.com.

**Kyslytsyn Oleksandr** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of physics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: apkyslytsyn@mail.ru.

**Taran Anatoliy** – Dr. Sc. Sciences, prof., head. Dep. Physics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: anatolytaran49@gmail.com.