

УДК 621.793.71

## ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕРМОСТОЙКОСТЬЮ

Докт. техн. наук, проф. ДЕВОЙНО О. Г., асп. ОКОВИТЫЙ В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: vasil\_ok@inbox.ru

В статье изложена оптимизация процессов получения максимального содержания тетрагональной фазы в исходном материале и в теплозащитных покрытиях на основе диоксида циркония и оксида гафния. Приведены результаты исследования фазового состава оксидной системы  $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ , которая представляет собой микроструктуру, похожую на диоксид циркония, трансформированную для использования при температуре 1300 °С, объяснен механизм влияния оксида гафния на формирование данной микроструктуры. Методика исследования основана на комплексных металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследованиях структурных элементов композиционных плазменных покрытий системы  $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ .

Для стабилизации диоксида циркония легирующий оксид должен не только иметь соответствующий размер иона металла, но и образовывать твердый раствор с диоксидом циркония. Это условие резко ограничивает число возможных стабилизаторов. Фактически такая стабилизация возможна только оксидами редкоземельных металлов ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ). Важное значение для получения качественных теплозащитных покрытий имеет химическая чистота применяемых материалов. Оксид гафния был выбран для использования в качестве порошка для теплозащитных покрытий вместо диоксида циркония ввиду их сходства в структурной модификации, решетке, химических и физических свойствах и его повышенной температуры структурных преобразований. Установлено, что плазменные теплозащитные покрытия  $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  состоят из одной тетрагональной фазы. Эта фаза эквивалентна неравновесной тетрагональной  $t'$ -фазе в системе «диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия». Сходство  $\text{Hf}^{+4}$  и  $\text{Zr}^{+4}$  катионов приводит к образованию одинаковых метастабильных фаз при быстрой закалке.

**Ключевые слова:** плазменные покрытия, диоксид циркония, фазовый состав.

Ил. 1. Библиогр.: 18 назв.

## PLASMA THERMAL BARRIER COATINGS BASED ON ZIRCONIUM DIOXIDE WITH HIGH THERMAL STABILITY

DEVOINO O. G., OKOVITY V. V.

Belarusian National technical University

The paper presents optimization of processes for obtaining maximum content of tetragonal phase in the initial material and thermal barrier coatings (TBC) based on zirconium dioxide and hafnium oxide. Results of the investigations on phase composition of oxide  $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  system have been given in the paper. The system represents a microstructure which is similar to zirconia dioxide and transformed for its application at 1300 °C. The paper explains a mechanism of hafnium oxide influence on formation of the given microstructure. The research methodology has been based on complex metallography, X-ray diffraction and electron microscopic investigations of structural elements of the composite plasma coating  $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  system.

In order to stabilize zirconium dioxide dopant oxide should not only have an appropriate size of metal ion, but also form a solid solution with the zirconia. This condition severely limits the number of possible stabilizers. In fact, such stabilization is possible only with the help of rare earth oxides ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ). Chemical purity of the applied materials plays a significant role for obtaining high-quality thermal barrier coatings. Hafnium oxide has been selected as powder for thermal barrier coatings instead of zirconium dioxide due to their similarities in structural modification, grating, chemical and physical properties and its high temperature structural transformations. It has been established that plasma thermal barrier  $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  coatings consist of one tetragonal phase. This phase is equivalent to a non-equilibrium tetragonal  $t'$ -phase in the “zirconium dioxide stabilized with yttrium oxide” system. Affinity of  $\text{Hf}^{+4}$  and  $\text{Zr}^{+4}$  cations leads to the formation of identical metastable phases during rapid quenching.

**Keywords:** plasma coatings, zirconium dioxide, phase composition.

Fig. 1. Ref.: 18 titles.

**Введение.** Добавление к  $\text{ZrO}_2$  стабилизирующих кубическую решетку оксидов  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$  расширяет область

стабильности кубической кристаллографической формы оксида циркония от точки плавления до комнатной температуры [1–4]. Это поз-

воляет избежать изменений объема, связанного с фазовыми превращениями. Следует заметить, что для стабилизации диоксида циркония легирующий оксид должен не только иметь соответствующий размер иона металла, но и образовывать твердый раствор с диоксидом циркония. Это условие резко ограничивает число возможных стабилизаторов. Фактически такая стабилизация возможна только оксидами редкоземельных металлов ( $Y_2O_3$ ,  $Yb_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $HfO_2$ ) [5–7].

Отрицательное влияние повышенного содержания стабилизаторов в исходном порошке на долговечность покрытий объясняется несколькими причинами [8–10]. Во-первых, исходные порошки имеют, как правило, неравномерное распределение стабилизатора по сечению, что наследуется в структуре покрытия. Во-вторых, наряду с выделениями богатых стабилизатором фаз типа  $Zr_3Y_4O_{12}$ ,  $Zr_3Yb_4O_{12}$ , в покрытии формируются зерна тетрагональной фазы состава  $ZrO_2 - 8,3\% Y_2O_3$ ,  $ZrO_2 - 12,3\% Yb_2O_3$  и превращенные в моноклинную фазу зерна состава  $ZrO_2 - 1,6\% Y_2O_3$ ,  $ZrO_2 - 6,2\% Yb_2O_3$ . Сегрегация стабилизатора в покрытии особенно заметно усиливается при его термообработке либо термоциклировании в случае стабилизации оксида циркония, что еще более усугубляет фазовую неоднородность покрытия. В-третьих, стабильность тетрагональной фазы во многом зависит от размера зерна фазовых включений, повышаясь с их уменьшением, что особенно заметно при размере зерна менее 1 мкм, поэтому достижение необходимого размера фазовых включений является задачей оптимизации технологии получения керамических порошков для теплозащитных покрытий (ТЗП). Характеристики плазменных теплозащитных покрытий зависят как от вида и состояния исходного порошка, так и собственно технологических параметров напыления [11].

В большинстве исследований влияния технологии плазменного напыления на долговечность покрытия отмечается, что вид и состояние исходного порошка для напыления оказывают решающее воздействие на качество напыленных покрытий из частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ). Важное значение для получения качественных ТЗП имеет химическая чистота применяемых мате-

риалов. Оксид гафния был выбран для использования в качестве порошка для ТЗП вместо диоксида циркония ввиду их сходства в структурной модификации, решетке, химических и физических свойствах и его повышенной температуры структурных преобразований [12–14]. Сходство  $Hf^{+4}$ - и  $Zr^{+4}$ -катионов приводит к образованию одинаковых метастабильных фаз при быстрой закалке. Отличия кристаллических решеток  $ZrO_2$  и  $HfO_2$  очень малы в связи с эквивалентной валентной зоной и почти эквивалентными ионными радиусами  $Zr^{+4}$  и  $Hf^{+4}$ . По этой причине в системе  $ZrO_2$ – $HfO_2$  могут образовываться непрерывные растворы замещения, и можно выделить рентгеновские дифракционные картины  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$  в твердых растворах только с помощью чрезвычайно высокого разрешения рентгеновского дифракционного метода.

Сходство между  $ZrO_2$ – $Y_2O_3$  и  $HfO_2$ – $Y_2O_3$  в равновесных фазовых диаграммах распространяется также на образование неравновесных фаз. Все рассмотренные составы диоксида гафния, частично стабилизированные оксидом иттрия, при быстром охлаждении показывают одну метастабильную  $t'$ -фазу с микроструктурой, эквивалентной чистой  $t'$ -фазе. Кроме этого, температура фазового превращения при переходе тетрагональной фазы в моноклинную с увеличением концентрации  $Y_2O_3$  уменьшается, а при увеличении концентрации  $HfO_2$  – увеличивается, что делает систему  $HfO_2$ – $Y_2O_3$  очень перспективной для получения ТЗП с заданными свойствами. Вследствие вышеизложенного было сделано предположение, что использование  $ZrO_2$ – $HfO_2$ – $Y_2O_3$  позволит получать ТЗП с ресурсом, превышающим ресурс  $ZrO_2$ – $CeO_2$  покрытия.

**Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония – оксида гафния, стабилизированных оксидом иттрия.** Целью данного исследования было изучение фазового состава новой оксидной системы  $HfO_2$ – $ZrO_2$ – $Y_2O_3$ , которая представляет собой микроструктуру, похожую на диоксид циркония, трансформированную для использования при более повышенных температурах, и объяснение механизма влияния оксида гафния на формирование данной микроструктуры. В качестве подложки были использованы образцы

сплавов Ni – 23Co – 20Cr – 8Al – 1Y вес. %. На подложки сначала методом VPS (вакуумного напыления) наносили подслои 100 мкм NiCrAlY. Методом APS (напыление на воздухе) наносили покрытия 300 мкм ( $\text{HfO}_2$  – 15 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; (50 %  $\text{HfO}_2$  – 50 %  $\text{ZrO}_2$ ) – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; (25 %  $\text{HfO}_2$  – 75 %  $\text{ZrO}_2$ ) – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ;  $\text{ZrO}_2$  – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Использовали керамические порошки со средним диаметром около 50 мкм. Фазовый состав порошков и покрытий определяли методом рентгеноструктурного анализа на рентгенографическом дифрактометре ДРОН-3, количественное содержание фаз – на сканирующем электронном микроскопе Nanolab-7. Были тщательно проанализированы  $\{111\}$  и  $\{400\}$  области  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{HfO}_2$  дифракционных картин.

Рентгеноструктурный анализ плазменно-напыленных покрытий для каждой композиции показал наличие только одной тетрагональной фазы. Действительно, в этих материалах моноклинный полиморфизм отличается от кубического и тетрагонального ( $t$  и  $t'$ ) полиморфизма через наблюдение за  $\{111\}_{m,t}$  отражением). С другой стороны,  $t$ - и  $t'$ -фазы могут быть дифференцированы по разделению  $\{400\}_c$ ,  $\{400\}_t$ ,  $\{400\}_{t'}$ ,  $\{004\}_t$  и  $\{004\}_{t'}$  отражений на высоких  $2\Theta$ -углах.

Части рентгеновских диаграмм в  $\{111\}$  области приведены для каждого образца на рис. 1. Рассмотрение этой области свидетельствует о наличии интенсивного отражения  $\{111\}$  тетрагональной фазы и очень слабых  $\{111\}$  отражений моноклинной фазы. Некоторое количество моноклинной фазы также обнаружено независимо от содержания гафния. Тем не менее расчеты, основанные на пике высоты над уровнем

фона [15–18], приводят к величине, менее чем 2 % для всех образцов. Эквивалентные рентгеновские дифракционные картины области  $\{400\}$  также показаны на рис. 1. Наличие двух пиков в этой области является характерной особенностью для тетрагональной  $t$ - или  $t'$ -фазы.

Определение значений доли иттрия в тетрагональной фазе проводили в соответствии с выражениями на основе экспериментальных работ [18]. Для (50 %  $\text{HfO}_2$  – 50 %  $\text{ZrO}_2$ ) – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; (25 %  $\text{HfO}_2$  – 75 %  $\text{ZrO}_2$ ) – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  высокое содержание  $\text{Y}_2\text{O}_3$  в тетрагональной фазе и  $c/a$ , соотношение близкое к единице, свидетельствует о наличии метастабильной  $t'$ -фазы. Для  $\text{HfO}_2$  – 15 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  оценка высокого содержания иттрия достигается только на основе  $c/a$  оценки. Это неудивительно, учитывая небольшую разницу между  $\text{Zr}^{+4}$ - и  $\text{Hf}^{+4}$ -ионными радиусами. Керамические микроструктуры всех композиций имеют тонкие равноосные зерна в диапазоне размеров 0,1–1,0 мкм, некоторые зерна иногда слегка удлиненные. Изучение микроструктуры достигается за счет использования метода визуализации темных областей. Тетрагональность в покрытии проявляется в экспериментальном режиме дифракции при наличии слабых отражений. С помощью этих отражений всегда можно обнаружить появление двойникования зерна и варианты областей тетрагональной структуры внутри каждого дифракционного двойного пика. Эти микроструктуры (микроструктуры внутри двойникования) – результат снижения симметрии в процессе  $c$ - $t'$ -смещающей (вытесняющей) трансформации [17].

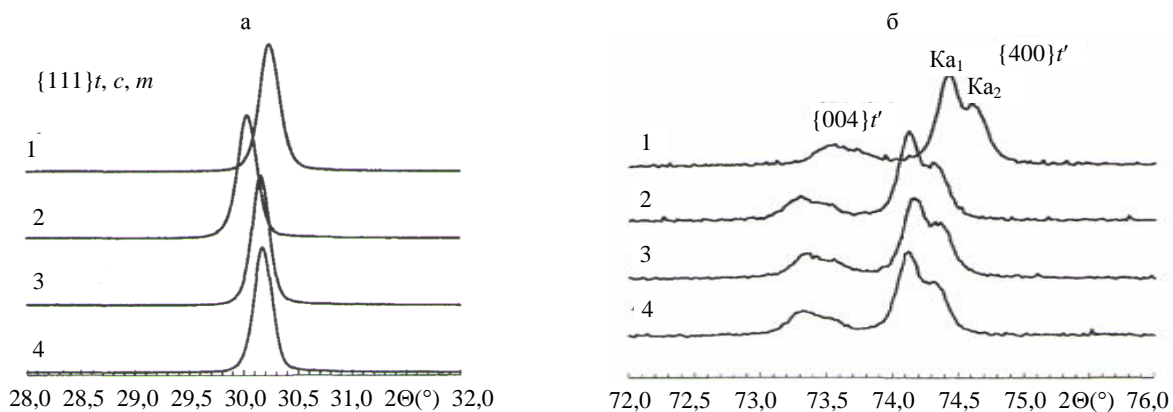


Рис. 1. Рентгенограммы плазменных покрытий в областях: а –  $\{111\}$ ; б –  $\{004\}$  (1 –  $\text{HfO}_2$  – 15 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; 2 – (50 %  $\text{HfO}_2$  – 50 %  $\text{ZrO}_2$ ) – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; 3 – (25 %  $\text{HfO}_2$  – 75 %  $\text{ZrO}_2$ ) – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; 4 –  $\text{ZrO}_2$  – 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ )

Двойникование в микроструктуре происходит потому, что имеются эквивалентные возможности для формирования тетрагональности вдоль любой из трех сторон  $\langle 100 \rangle$  оси «прародительской» кубической ячейки. На уровне субзерен наблюдаемая тетрагональная фаза также совпадает по микроструктурным особенностям с хорошо изученной  $t'$ -фазой в  $ZrO_2 - 8\% Y_2O_3$  [15, 18].

Таким образом, фазовый состав и микроструктура  $HfO_2-ZrO_2-Y_2O_3$ -покрытий хорошо согласуются с предположениями авторов. Было однозначно установлено, что все покрытия состоят из одной тетрагональной фазы. Эта фаза эквивалентна так называемой  $t'$ -фазе [16] в системе «диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия», так как содержание иттрия в покрытии соответствует его содержанию в исходном порошке:

- измеренное соотношение  $c/a$  только немного отличается (в 1,03 раза) в сравнении с  $c/a$  в трансформируемой равновесной  $t$ -фазе;
- трансформируемая равновесная  $t$ -фаза не превращается в моноклинную, даже когда к покрытию прикладывается механическая энергия.

Сходство  $Hf^{+4}$ - и  $Zr^{+4}$ -катионов приводит к образованию одинаковых метастабильных фаз при быстрой закалке. Результаты микроструктурных исследований двойникования зерен  $t'$ -фазы показали большое сходство с результатами [17, 18] в чистых (без оксида гафния) покрытиях из диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия.

## ВЫВОД

Исследован фазовый состав новой оксидной системы  $HfO_2-ZrO_2-Y_2O_3$ , которая представляет собой микроструктуру, похожую на диоксид циркония, трансформированную для использования при температурах 1300 °С, и объяснен механизм влияния оксида гафния на формирование данной микроструктуры. Установлено, что все покрытия  $HfO_2-ZrO_2-Y_2O_3$  состоят из одной тетрагональной фазы. Эта фаза эквивалентна неравновесной тетрагональной  $t'$ -фазе в системе «диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия», так как содержание иттрия в покрытии соответствует его содержанию в исходном порошке.

Измеренное соотношение  $c/a$  только немного отличается (в 1,03 раза) в сравнении с  $c/a$  в трансформируемой равновесной  $t$ -фазе. Она не превращается в моноклинную, даже когда к покрытию прикладывается механическая энергия. Сходство  $Hf^{+4}$ - и  $Zr^{+4}$ -катионов приводит к образованию одинаковых метастабильных фаз при быстрой закалке. Результаты микроструктурных исследований двойникования зерен  $t'$ -фазы показали большое сходство с более ранними результатами в чистых (без оксида гафния) покрытиях из диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Теплозащитные** покрытия на основе  $ZrO_2$  / А. Ф. Ильющенко [и др.] – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.
2. **Khor, K. A.** Properties of Plasma Sprayed Functionally Graded YSZ / NiCoCr AlY Composite Coatings / K. A. Khor, Y. W. Gu, Z. L. Dong // Thermal Spray 2000: Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Thermal Spray Conference. – Kobe (Japan), 2000. – P. 1241–1248.
3. **Porter, D. L.** Mechanisms of Toughening Partially Stabilized Zirconia (PSZ) / D. L. Porter, H. Heuer // Journal of the American Ceramic Society. – 2006. – Vol. 6, No 3. – P. 183–184.
4. **Singheiser, L.** The Performance of High Temperature Corrosion Resistant Coatings on Superalloys Nuclear Extended Laboratory Tests / L. Singheiser // 1<sup>st</sup> Plasma Technic. Symposium Lucerne. – 1998. – Vol. 2. – P. 164–173.
5. **Robert, M.** Mikrostructural Evolution in Co-P37 and the Room Temperature Instability of Tetragonal  $ZrO_2$  / M. Robert // The Amer. Ceram. Soc. – 1997. – Vol. 10, No 4. – P. 214–220.
6. **Оковитый, В. А.** Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 1998. – Вып. 21. – С. 101–105.
7. **Оковитый, В. А.** Разработка теплозащитных плазменных покрытий / В. А. Оковитый // Сварка и родственные технологии. – 2005. – Вып. 7. – С. 80–82.
8. **Оковитый, В. А.** Оптимизация процесса нанесения  $ZrO_2-Y_2O_3$  / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 245–249.
9. **Математическая** модель тепловых процессов, происходящих при формировании покрытий на основе  $ZrO_2$  / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2009. – Вып. 32. – С. 9–20.
10. **Моделирование** порообразования при формировании теплозащитных плазменных покрытий на основе диоксида циркония / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2011. – Вып. 34. – С. 36–40.

11. **Создание** градиентных плазменных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного диоксидом иттербия / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник БНТУ. – 2011. – № 6. – С. 5–9.

12. **Формирование** газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беспринт, 2002. – 480 с.

13. **Ильющенко, А. Ф.** Плазменные покрытия на основе керамических материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Беспринт, 2006. – 316 с.

14. **Padovan, J.** Thermo-Mechanical Behaviour of Plasma-Sprayed HfO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings / J. Padovan // *Ceram. Eng. and Sci.* – 2007. – No 8. – P. 27–38.

15. **Alperine, S.** Microstructural Investigation of Plasma Sprayed Ytria Partially Stabilized Zirconia TBC / S. Alperine, L. Lelait // *J. Eng. Gas Turbines Power.* – 1994. – Vol. 116, No 1. – P. 258–265.

16. **Alperain, S.** TEM Investigations of High Toughness Non-Equilibrium Phases in the ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System / S. Alperain // *Scripta Metallurgica et Materiala.* – 1991. – Vol. 25, No 8. – P. 1815–1820.

17. **Lelait, L.** Etude Microstructurale Fine de Revêtements Ceramiques du Type Barriere Thermique: Incidence Sur la Resistance Thermomecanique de Ces Revetements / L. Lelait // PhD Thesis, Université Paris-Sud (U.F.R. d'Orsay). – France, 1991.

18. **Ibegazene, H.** Ytria Stabilized Hafnia-Zirconia Thermal Barrier Coatings: Influence of Hafnia Addition on TBC Structure and High Temperature Behavior / H. Ibegazene, S. Alperine, C. Diot // *Journal of Materials Science.* – 1995. – Vol. 30, No 4. – P. 938–951.

## REFERENCES

1. **П'иушченко, А. Ф.,** Ivashko, V. S., Okovityi, V. A., & Sobolevskii, S. B. (1998) *Thermal Barrier Coatings on ZrO<sub>2</sub> Basis.* Minsk, Remika, 128 p. (in Russian).

2. **Khor, K. A.,** Gu, Y. W., & Dong, Z. L. (2000) Properties of Plasma Sprayed Functionally Graded YSZ / NiCoCr AlY Composite Coatings. *Thermal Spray 2000: Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Thermal Spray Conference.* Kobe, Japeny, 1241–1248.

3. **Porter, D. L.,** & Heuer, H. (2006) Mechanisms of Toughening Partially Stabilized Zirconia (PS2). *Journal of the American Ceramic Society,* 6 (3), 183–184. Doi: 10.1111/j.1151-2916.1977.tb15509.x.

4. **Singheiser, L.** (1998) The Performance of High Temperature Corrosion Resistant Coatings on Superalloys Nuclear Extended Laboratory Tests. *1<sup>st</sup> Plasma Technic. Symposium Lucerne,* 2, 164–173.

5. **Robert, M.** (1997) Microstructural Evolution in Co-P37 and the Room Temperature Instability of Tetragonal ZrO<sub>2</sub> *The Amer. Ceram. Soc.,* 10 (4), 214–220.

6. **Okovity, V. A.** (1998) Influence of Technological Parameters of TBC Ceramic Layer on Resistance to Thermal Cycling. *Poroshkovaya Metalurgia. Respublikanskii Mezhdomestvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 21, 101–105 (in Russian).

7. **Okovity, V. A.** (2005) Development of Thermal Barrier Plasma Coatings. *Svarka i Rodstvennyye Tekhnologii* [Welding and Related Technologies], 7, 80–82 (in Russian).

8. **Okovity, V. A.** (2007) Optimization of ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Depositing Process. *Poroshkovaya Metalurgia. Respublikanskii Mezhdomestvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 30, 245–249 (in Russian).

9. **П'иушченко, А. Ф.,** Okovityi, V. A., Gromyko, G. F., Shevtsov, A. I., Panteleenko, F. I., Matsuka, N. P., & Okovityi, V. V. (2009) Mathematical Model of Thermal Processes Occurring During Formation of ZrO<sub>2</sub>-Based Coatings. *Poroshkovaya Metalurgia. Respublikanskii Mezhdomestvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 32, 9–20 (in Russian).

10. **П'иушченко, А. Ф.,** Kusin, R. A., Cherniak, I. N., Kusin, A. R., Zhegzdrin', D. I., Maniilo, E. D., & Kaptsevich, V. M. (2011) Simulation of Pore Formation While Developing Thermal Barrier Coatings on the Basis of Zirconium Dioxide. *Poroshkovaya Metalurgia. Respublikanskii Mezhdomestvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, 34, 36–40 (in Russian).

11. **Okovityi, V. A.,** Panteleenko, F. I., Devoino, O. G., Okovityi, V. V., Sobolevskii, S. B., & Shevtsov, A. I. (2011) Development of Gradient Plasma Coatings on the Basis of Zirconium Dioxide Stabilized with Yttrium Oxide. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 6, 5–9.

12. **П'иушченко, А. Ф.,** Okovityi, V. A., Kundas, S. P., & Formanek, B. (2002) *Formation of Gas and Thermal Coatings: Theory and Practice.* Minsk, Besprint. 480 p. (in Russian).

13. **П'иушченко, А. Ф.,** Okovity, V. A., & Shevtsov, A. I. (2006) *Plasma Coatings on the Basis of Ceramic Materials.* Minsk, Besprint. 316 p. (in Russian).

14. **Padovan, J.** (2007) Thermo-Mechanical Behaviour of Plasma-Sprayed HfO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings. *Ceram. Eng. And Sci.,* 8, 27–38.

15. **Alperine, S.,** & Lelait, L. (1994) Microstructural Investigation of Plasma Sprayed Ytria Partially Stabilized Zirconia TBC. *J. Eng. Gas Turbines Power,* 116 (1), 258–265. Doi: 10.1115/1.2906802.

16. **Alperine, S.,** & Lelait, L. (1991) TEM Investigations of High Toughness Non-Equilibrium Phases in the ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System. *Scripta Metallurgica et Materiala,* 25 (8), 1815–1820. Doi: 10.1016/0956-716X(91)90310-W.

17. **Lelait, L.** (1991) *Etude Microstructurale Fine de Revêtements Céramiques du Type Barrière Thermique: Incidence Sur la Résistance Thermomécanique de ces Revêtements.* [Microstructural Study Of Thermal Barrier Coating Application of the Thermomechanical Resistance of this Coating. PhD Thesis]. Université Paris-Sud (U.F.R. d'Orsay), France. (in French).

18. **Ibegazene, H.,** Alperine, S., & Diot, C. (1995) Ytria Stabilized Hafnia-Zirconia Thermal Barrier Coatings: Influence of Hafnia Addition on TBC Structure and High Temperature Behavior. *Journal of Materials Science,* 30 (4), 938–951.

Поступила 28.04.2014