

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВИХ ПОРОШКОВИХ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ З $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

О. М. ДУБОВИЙ, А. А. КАРПЕЧЕНКО, С. І. ШКУРАТ, М. М. БОБРОВ, Є. Ю. НЕДЕЛЬКО

Кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, УКРАЇНА

*email: laborantmtm@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі досліджена можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристиалізаційною термічною обробкою та встановлені її оптимальні температурно-часові параметри, що забезпечують підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Проведений аналіз мікроструктури та фазового складу покриттів.

Ключові слова: діоксид цирконію; термічна обробка; теплопровідність; теплозахисне плазмове покриття; полігонізація

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF INCREASING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF $ZrO_2-7\% Y_2O_3$ PLASMA POWDER THERMAL BARRIER COATINGS BY PRE-RECRYSTALLIZATION HEAT TREATMENT

O. M. DUBOVYI, A. A. KARPECHENKO, S. I. SHKURAT, M. M. BOBROV, Ye. Yu. NEDEL'KO

Department of Material Science and technology of metals, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT This article discusses the problem of increasing the physical and mechanical properties of thermal barrier plasma sprayed coatings from the powder $ZrO_2-7\% Y_2O_3$, which are widely used to protect against corrosion and to reduce gas temperature of gas turbine engine blades surface. Analyzed the current methods provide enhanced properties of these coatings and revealed the necessity of the use predrecrystallization heat treatment to solve this problem. Yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings were produced by atmospheric plasma spraying. These coatings were subjected to heat treatment in air at 1200 °C and 1300 °C from 5, 10, 15, 20, 25 and 30 min. The structural characteristics of powders and coatings were evaluated using optical microscope.

It is found that the optimum heat treatment conditions of thermal barrier plasma sprayed coatings from the powder $ZrO_2-7\% Y_2O_3$ that enhances hardness by 13% and reduced the thermal conductivity of the ceramic layer is 15% compared with the state after deposition by changes substructure is heated to a temperature of 1300 °C, aged for 15 minutes and cooling in air. The phase analyses of coatings were conducted by X-ray method. The phase analysis of the ceramic layer after heat treatment, showed the following phase content, %: monoclinic - 5; tetragonal - 25; cubic - 70. It is shown that the rapid cooling prevents phase transformation: with increasing cooling rate during heat treatment with 0.02 °C/sec to 34 °C/sec tetragonal phase content increased to 40% and the content of monoclinic - not fixed.

Keywords: zirconia dioxide; heat treatment; thermal conductivity; thermal barrier plasma sprayed coating; polygonization

Вступ

Широке поширення теплозахисних покриттів обумовлено зростанням потужності, ККД і робочої температури газотурбінних двигунів (ГТД), необхідністю захисту їх деталей від агресивного впливу високотемпературного газового потоку. Традиційне теплозахисне покриття, напилене на поверхню підкладки з жароміцного сплаву, є багатошаровою композицією: внутрішній металевий жаростійкий шар на основі сплавів типу $MeCrAlY$ і зовнішній керамічний шар з низьким рівнем теплопровідності на основі діоксиду цирконію, частково стабілізованого оксидом ітрію $ZrO_2-7\%Y_2O_3$

(YSZ). Використання даних покриттів на лопатках забезпечує можливість підвищення температури газового потоку і підвищує їх працездатність за рахунок зниження температури поверхні жароміцного сплаву.

Удосконалення теплозахисних покриттів необхідно для поліпшення їх службових характеристик, в першу чергу, зниження теплопровідності зовнішнього керамічного шару, що дозволить зменшити термічне навантаження на жаростійкий металевий шар та напилену деталь і підвищення терміну їх служби на деталях з жароміцних сплавів в умовах тепловмін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нанесення багатшарових теплозахисних покриттів проводиться з використанням різних технологічних процесів: магнетронного розпилення, електронно-променевого осадження, плазмового напилення та ін. При конденсаційних методах формується шар діоксиду цирконію з чітко вираженою стовбчастою мікроструктурою, що забезпечує підвищення довговічності покриттів в умовах тепловміни [1]. Однак покриття, нанесені за допомогою атмосферного плазмового напилення, характеризуються значно нижчими показниками коефіцієнту теплопровідності (0,7...0,9 Вт/м·К), у порівнянні з конденсаційними покриттями (1,8...2 Вт/м·К), що пояснюється переважно перпендикулярним розміщенням границь між частинками (ламельами) та пор по відношенню до градієнта зміни температури [2].

Одним з напрямків поліпшення властивостей покриттів є розвиток напилюваних матеріалів, що полягає у легуванні ZrO_2 рідкоземельними оксидами. Вони забезпечують формування кластерів легуючої речовини, які, в свою чергу, знижують питому теплопровідність, однак їх вміст негативно позначається на термоциклічній довговічності покриття [3].

Подальшого підвищення функціональних властивостей напилених покриттів можна досягти наноструктуруванням. Відомо [4], що наноструктуровані YSZ покриття мають теплопровідність на 40 % нижче та характеризуються підвищеною термоциклічною довговічністю. Подача ультрадисперсних порошоків до плазмового струменя здійснюється у вигляді агломератів [5] або суспензії [6], що пов'язано з труднощістю підготовкою напилюваних матеріалів та додатковою конструктивною модернізацією обладнання.

Розроблено спосіб деформаційно-термічної обробки (передрекристалізаційна термічна обробка) напилених покриттів із металів та сплавів при температурі близькій до температурного порогу рекристалізації [7], що забезпечує підвищення твердості на 30...70% та зниження теплопровідності на 30%. Однак відсутні дослідження щодо впливу згаданої термічної обробки на фізико-механічні властивості теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$, що найбільш поширені у газотурбобудуванні.

Мета роботи

Дослідження можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристалізаційною термічною обробкою.

Виклад основного матеріалу

У роботі в якості підкладки під нанесення плазмового теплозахисного покриття використовували нікелевий жароміцний сплав. Для підготовки поверхні зразків, безпосередньо перед напиленням, використовували установку струменево-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь». Ситову класифікацію застосовуваних порошоків проводили на лабораторній установці модель 029, використовуючи сітку номерів 004 і 008. У результаті просівання виділено порошки фракції 40...80 мкм.

Порошок сплаву Co-Cr-Al-Y-Si перед напиленням нагрівали у сушильній шафі ШСВ 3,5.3,5.6/3,5 при температурі 150 °С протягом 5 годин. Керамічний порошок $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ марки ЦрОІІ-7 висушували в лабораторній електричній печі типу СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1 при температурі 700 °С протягом 5 годин.

Вагу порошоків для отримання механічної суміші здійснювали на лабораторних вагах загального призначення, що забезпечують зважування з похибкою не більше 0,05 г за ДСТУ 7270: 2012. В результаті отримана механічна порошокова суміш, що складається з 90% (мас.) Co-Cr-Al-Y-Si і 10% (мас.) $ZrO_2-7\%Y_2O_3$.

Напилення на підкладку теплозахисного градієнтного покриття здійснювали в три етапи:

1. Напилення підшару з порошку Co-Cr-Al-Y-Si;
2. Нанесення проміжного шару з порошоків суміші Co-Cr-Al-Y-Si + 10% (мас.) $ZrO_2-7\%Y_2O_3$;
3. Напилення керамічного шару з порошку $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ (близько 0,3 мм).

Напилення підшару Co-Cr-Al-Y-Si і проміжного шару Co-Cr-Al-Y-Si + 10% (мас.) $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ здійснювалося у режимі, близькому до зазначеного у роботі [8].

Безпосередньо після нанесення підшару і проміжного шару заданої товщини напилювали керамічний шар з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ у наступному режимі:

Сила струму, А.....305
Напруга, В.....115
Плазмотвірний газ.....аргон
Тиск плазмотвірного газу, МПа.....0,15
Транспортуючий газ.....стиснене повітря
Дистанція напилення, мм80
Середня величина деформації частинок керамічного шару складала 70...80%.

Для поліпшення властивостей, спікання кераміки і зниження внутрішніх напружень, що виникли у процесі формування теплозахисних градієнтних плазмових покриттів, проводили додатково термічну обробку. Термічну обробку за прийнятою технологією здійснювали у вакуумній печі радіаційного нагрівання СНО-1-3-1/16Н1 у наступних режимах: вакуум $2 \cdot 10^{-2}$ Па; температура витримки

1050 ± 5 °C; час витримки 2 години; охолодження разом з пиччою у вакуумі до температури навколишнього середовища зі швидкістю $\approx 0,02$ °C/c.

Фазовий аналіз керамічного шару після термічної обробки, здійснений на дифрактометрі ДРОН-3 показав наступний вміст фаз, %: моноклінної – 5; тетрагональної – 25; кубічної – 70. Відомо, наприклад [9], що довговічність покриття визначається перед усім вмістом тетрагональної фази і підвищується зі збільшенням останньої. Нами встановлено, що при збільшенні швидкості охолодження при термічній обробці з $0,02$ °C/c до 34 °C/c вміст тетрагональної фази підвищується до 40%, а вміст моноклінної – не фіксується.

Для визначення режиму передрекристалізаційної обробки треба, хоча б приблизно, знати величину температурного порогу рекристалізації. Температурний поріг рекристалізації $ZrO_2-7\% Y_2O_3$ за різними джерелами лежить у діапазоні від 1000 °C до 1400 °C [10]. У якості джерела нагрівання застосовували карбідкремнієвий нагрівач типу КЕНА – ВТ з робочою температурою на поверхні нагрівача до 1450 °C. Для контролю температури використовували ППТ термопару тип S (платина - 10% родій/платина).

Мікротвердість $H\mu$ визначалася на приладі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 200 г. Знімки мікроструктур отримували за допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCE-20C*, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень *Scope Image 9.0*, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3. Пористість визначали за допомогою металографії планіметричним методом. Дослідження теплопровідності покриттів проводили за допомогою вимірювача ИТ- λ -400, похибка вимірювань якого становить $\pm 10\%$.

Обговорення результатів

Вибір оптимальних температурно-часових параметрів, які забезпечують максимальну твердість після напilenня, передрекристалізаційної термічної обробки покриттів здійснювали за показниками мікротвердості. Попередні дослідження проводили при нагріванні до 1100 °C з витримкою 10, 20, 30 хв і швидкістю охолодження 34 °C/c. Ефекту зміцнення при цьому не зафіксовано, тому у подальшому застосовували вищі показники температури.

Результати впливу тривалості витримки на мікротвердість покриттів при температурі 1200 °C та 1300 °C з охолодженням до кімнатної температури зі швидкістю 34 °C/c представлені на рис. 1. Нагрівання до більш високих температур не застосовують через імовірність підплавлення границь зерен металевих сплавів. У відповідності до діаграми стану системи $ZrO_2-Y_2O_3$ [11] фазові перетворення у кераміці складу $ZrO_2-(6-8)\% Y_2O_3$ відбуваються в інтервалі температур $600 - 800$ °C за евтектоїдним механізмом – тетрагональна модифікація при охолодженні

розпадається на моноклінну і кубічну. Такі ж висновки можна зробити при аналізі діаграми, яка наведена в роботі [12]. Авторами робіт [13,14] вказано, що швидкість евтектоїдного перетворення в системі $ZrO_2-Y_2O_3$ досить низька і прискорене охолодження дозволяє його уникнути. Крім цього, фазові перетворення в системі $ZrO_2-Y_2O_3$ здійснюються зі значним температурним гістерезисом. Мікротвердість керамічного шару після напilenня складала $11,5$ ГПа.

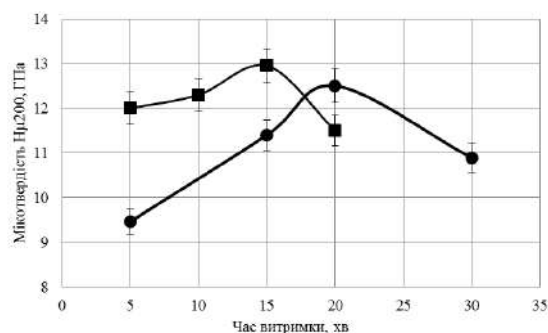
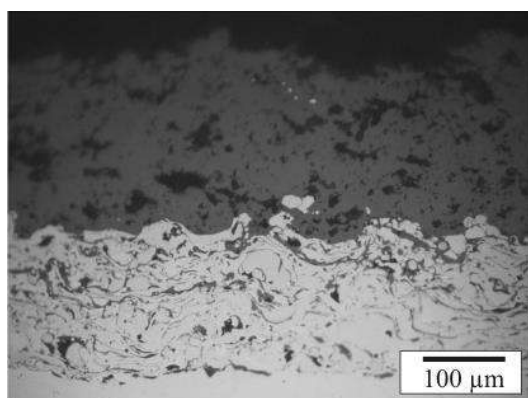


Рис. 1 - Залежність мікротвердості плазмових теплозахисних покриттів з $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ від тривалості витримки при передрекристалізаційній термічній обробці:

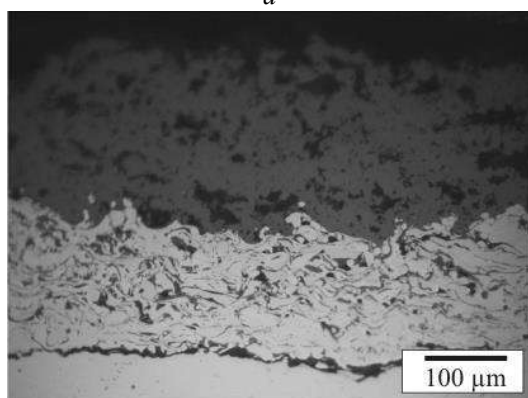
● – температура 1200 °C; ■ – температура 1300 °C

Згідно з представленими даними встановлено, що залежність носить екстремальний характер з виразним максимумом, при цьому відповідну температуру і витримку можна вважати оптимальними. Значення мікротвердості керамічного шару підвищується після передрекристалізаційної термічної обробки при температурі 1200 °C і витримці 20 хв на 10%, при температурі 1300 °C, витримці 15 хв – 13%. Отже, при підвищенні температури точка максимального зміцнення зміщується у діапазон менших витримок, що пов'язано, можливо, зі збільшенням швидкості полігонізаційних процесів за рахунок термічної активації.

Представлені мікроструктури теплозахисного плазмового градієнтного покриття (рис. 2) складаються з трьох послідовно напilenних шарів: перший підшар - Co-Cr-Al-Y-Si товщина якого становить 110 мкм; другий (проміжний) шар - механічна суміш Co-Cr-Al-Y-Si + 10% (мас.) $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ товщиною 90 мкм; третій шар - $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ товщиною 280 мкм. Підшар і проміжний шари слабо диференціюються, мають лускату будову, що пов'язано з достатнім проплавленням металевої складової покриття. У проміжному шарі проглядається сіра фаза $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$. Пористість керамічного шару у обох випадках складає близько 10%. Величина деформації керамічних частинок складає 76%.



а



б

Рис. 2 - Мікроструктури теплозахисного градієнтного покриття:
а – після напилення; б – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки

Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що змін у структурі покриттів до і після термообробки не спостерігається. Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм, що пояснюється роздільною здатністю людського ока та оптичного мікроскопу.

Для визначення теплопровідності виготовляли зразки лише керамічного шару без підкладки та проміжних шарів товщиною 0,5...0,8 мм діаметром 15 мм. Температура випробувань – 25 °С. Результати досліджень наведені на рис. 3.

Аналіз приведених результатів показує, що передрекристалізаційна термічна обробка забезпечує зниження коефіцієнта теплопровідності на 15 %. Оскільки пористість покриття не змінилася при термічній обробці (рис. 2), то дане зниження теплопровідності забезпечується лише за рахунок субструктурних змін.

Таким чином, перспективи подальшого розвитку досліджень полягають у детальному вивченні впливу вказаної термічної обробки на субструктуру теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ із застосуванням методів рентгенофазового та рентгеноструктурного аналізу.

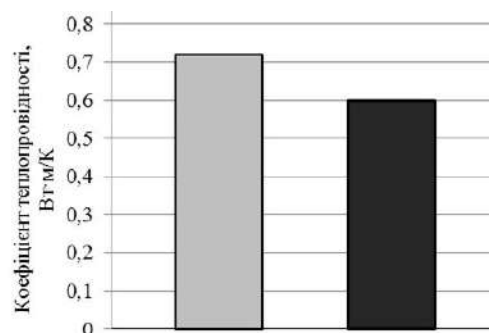


Рис. 3 - Результати визначення коефіцієнта теплопровідності плазмових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$:

□ – після напилення, ■ – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки

Висновки

1. Експериментально підтверджена можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристалізаційною термічною обробкою.

2. Визначений оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки теплозахисного градієнтного плазмового покриття з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ що забезпечує підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Режим полягає у нагріванні до температури 1300 °С, витримці протягом 15 хв та охолодженні на повітрі.

Список літератури

1. Яковчук, К. Ю. Теплопроводность и термоциклическая долговечность конденсационных термобарьерных покрытий / К. Ю. Яковчук // *Автоматическая сварка* - 2014. - № 4. - С. 25 – 31.
2. Schulz, U. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings / U. Schulz, C. Leyens, K. Fritscher et al. // *Aerosp. Sci. Technol.* – 2003.- № 7. – P.73. doi: 10.1016/S1270-9638(02)00003-2
3. Zhong, X. Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate/YSZ double-layered thermal barrier coating / X. Zhong, H. Zhao, X. Zhou et al. // *J. of alloy and compounds.* – 2014. – № 593. – P. 50 – 55. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.060
4. Jing, W. Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ / W. Jing, G. Hong, Z. Le, L. Wang, G. Sheng // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2010. – № 19 (6). – P. 1186 – 1194. doi: 10.1007/s11666-010-9535-7
5. Diez, P. The influence of powder agglomeration methods on plasma sprayed yttria coatings / P. Diez, R.W. Smith // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 1993. – № 2 (2). – P. 165 – 172. doi: 10.1007/BF02652025
6. Tingaud, O. $Al_2O_3-ZrO_2$ finely structured multilayer architectures from suspension plasma spraying / O. Tingaud, A. Denoirjean, J-F. Coudert, P. Fauchais //

- Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010. – № 19. – P. 207 – 218. doi: 10.1007/s11666-009-9436-9
7. Пат. 88755 Україна, МПК С 23 С 4/18. Спосіб нанесення покриттів / **О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов**; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № а 2009 02658, заявл. 23.03.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.
 8. **Борисов, Ю. С.** Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / **Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко и др.** // К.: «Наукова думка», 1987. – 544 с.
 9. **Ивашко, В. С.** Технологические возможности плазменного напыления теплозащитных покрытий / **В. С. Ивашко, А. А. Верстак, А. Ф. Ильюшенко** // *Газотермические и вакуумные покрытия в энергетике и двигателестроении: Сб. науч. трудов Ин-т электросварки им. Е. О. Патона*. – 1989. – С. 33 – 42.
 10. **Канаки, А. В.** Особенности структуры и фазового состава порошков системы ZrO_2 - MgO / **А. В. Канаки, С. П. Буйкова, С. Н. Кульков** // *Известия высших учебных заведений*. – 2013. - № 7/2. – С. 251 – 255.
 11. **Tetsuo, N.** The liquidus curve of the ZrO_2 - Y_2O_3 system as measured by a solar furnace / **N. Tetsuo, M. Massao, T. Yamrada** // *Bulletin of Chemical Society of Japan*. – 1970. – V 43. – P. 2614 – 2616. doi: 10.1246/bcsj.43.2614
 12. **Горелов, В.** Фазовая диаграмма систем ZrO_2 - Y_2O_3 в области малых содержаний оксида иттрия / **В.П. Горелов** // *Тр. Ин-та электрохимии УНЦ АН СССР*. – 1978. – № 28. – С. 69 – 75.
 13. **Глушкова, В.** Исследование особенностей твердых растворов в системе ZrO_2 - Y_2O_3 в монокристаллическом состоянии / **В.Б. Глушкова, В. В. Осико, Л. Г. Щербак ова, и др.** // *Изв. АН СССР. Неорг. мат.* – 1977. Т 13. – № 12. – С. 2197 – 2201.
 14. **Портной, К.** Синтез и исследование свойств сложные окислов редкоземельных элементов и циркония / **К.И. Портной, Н. И. Тимофеева, С. Е. Салибеков, и др.** // *Изв. АН СССР. Неорг. мат.* – 1972. Т 8. – № 2. – С. 406 – 408.
 4. **Jing W.** Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, **19**, 1186 – 1194. doi: 10.1007/s11666-010-9535-7
 5. **Diez P.** The influence of powder agglomeration methods on plasma sprayed yttria coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 1993, **2**, 165 – 172. doi: 10.1007/BF02652025
 6. **Tingaud, O.** Al_2O_3 - ZrO_2 finely structured multilayer architectures from suspension plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, **19**, 207 – 218. doi: 10.1007/s11666-009-9436-9
 7. **Dubovyy O. M., Yankovets' T. A., Karpechenko A. A., Zhdanov O. O.** Patent. Sposib nanessenyya pokryttiv [Method of spraying coating], 2009,21.
 8. **Borisov, Yu. S., Harlamov, Yu. A., Sidorenk, S. L.** Gazotermicheskie pokryitiya iz poroshkovyih materialov. Spravochnik [Thermal spray coating material powder. Directory]. Kyiv. «Scientific thought», 1987, 544.
 9. **Ivashko, V. S., Verstak, A. A., Pyushenko A. F.** Tehnologicheskie vozmozhnosti plazmennogo napyleniya teplozashchitnyh pokryitiy [Technological capabilities of plasma spraying thermal barrier coatings], *Gazotermicheskie i vakuumnye pokryitiya v energetike i dvigatelestroeni [Thermal and vacuum coating power and propulsion engineering]*, 1989, **33** – 42.
 10. **Kanaki, A. V., Buyakova S. P., Kulkov S. N.** Osobennosti struktury i fazovogo sostava poroshkov sistemy ZrO_2 - MgO [Features of the structure and phase composition of the powder system ZrO_2 - MgO], *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy [News of Higher Schools]*, 2013, **7/2**, 251-255.
 11. **Tetsuo, N., Massao M., Yamrada T.** The liquidus curve of the ZrO_2 - Y_2O_3 system as measured by a solar furnace, *Bulletin of Chemical Society of Japan*, 1970, **43**, 2614 – 2616. doi: 10.1246/bcsj.43.2614
 12. **Gorelov, V. P.** Fazovaya diagramma sistem ZrO_2 - Y_2O_3 v oblasti malyih soderzhaniy oksida itriya [Phase diagram of ZrO_2 - Y_2O_3 systems in the region of small yttrium oxide content] *Tr. In-ta elektrohimii UNTs AN SSSR [Proceedings of the Institute of Electrochemistry UNTs AN SSSR]*, 1978, **28**, 69-75.
 13. **Glushkova, V. B., Osiko V. V., Scherbakova L. G.** Issledovanie osobennostey tverdykh rastvorov v sisteme ZrO_2 - Y_2O_3 v monokristallicheskom sostoyanii [Investigation of the features of solid solutions in the ZrO_2 - Y_2O_3 system in a single-crystal state] *Izv. AN SSSR. Neorg. mat. [News of AN SSSR. Inorganic materials]*, 1977, **12**, 2197-2201.
 14. **Portnoy, K. I., Timofeeva N. I., Salibekov S. E.** Sintez i issledovanie svoystv slozhnyie oksislov redkozemelnyih elementov i tsirkoniya [Synthesis and study of the properties of complex oxides of rare-earth elements and zirconium] *Neorg. mat. [News of AN SSSR. Inorganic materials]*, 1972, **2**, 406-408.

Bibliography (transliterated)

1. **Yakovchuk, K. Yu.** Teploprovodnost i termotsiklicheskaya dolgovechnost kondensatsionnyih termobaremnyih pokryitiy [Thermal conductivity and durability thermocyclic condensing of thermal barrier coating], *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 2014, **4**, 25-31.
2. **U. Schulz.** Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings, *Aerosp. Sci. Technol.* **7**, 2003, 73. doi: 10.1016/S1270-9638(02)00003-2
3. **Zhong, X.** Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate/YSZ double-layered thermal barrier coating, *J. of alloy and compounds*, 2014, **593**, 50 – 55. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.060

Відомості про авторів (About authors)

Дубовий Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, завідувач кафедрою матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; e-mail: oleksandr.dubovyy@nuos.edu.ua.

Oleksandr Mykolayovych Dubovyy – Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Head of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.dubovyy@nuos.edu.ua.

Карпеченко Антон Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; e-mail: karpechenkoanton@gmail.com.

Anton Anatoliyovych Karpechenko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Docent of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: karpechenkoanton@gmail.com.

Шкурат Сергій Іванович – кандидат хімічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна.

Serhiy Ivanovych Shkurat - Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), Docent, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Docent of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine.

Бобров Максим Миколайович – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Maksim Mikolayovich Bobrov - Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Scientific Associate, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Неделько Євгеній Юрійович - Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, інженер, м. Миколаїв, Україна; e-mail: ynedelko76@gmail.com.

Yevheniy Yuriyovych Nedel'ko - National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, engineer, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: ynedelko76@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Дубовий, О. М. Дослідження можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристиалізаційною термічною обробкою / **О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, С. І. Шкурат, М. М. Бобров, Є. Ю. Неделько** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 49-54. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

Please cite this article as:

Dubovyy, O., Karpechenko, A., Shkurat, S., Bobrov, M., Nedel'ko, Ye. Investigation possibilities of increase physical and mechanical properties of plasma powder thermal barrier coatings $ZrO_2-7\% Y_2O_3$ by predrecrystallization heat treatment *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 49-54, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Дубовой, А. Н. Исследование возможности повышения физико-механических свойств плазменных порошковых теплозащитных покрытий из $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристиаллизационной термической обработкой / **А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат, М. Н. Бобров, Е. Ю. Неделько** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – 7 (1229). – С. 49-54. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07.

АННОТАЦИЯ В работе исследована возможность повышения физико-механических свойств плазменных порошковых теплозащитных покрытий из $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристиаллизационной термической обработкой и установлены ее оптимальные температурно-временные параметры, обеспечивающее повышение твердости на 13% и снижение теплопроводности керамического слоя на 15% по сравнению с состоянием после напыления за счет субструктурных изменений. Проведенный анализ микроструктуры и фазового состава покрытий.

Ключевые слова: диоксид циркония; термическая обработка; теплопроводность; теплозащитное плазменное покрытие; полигонизация

Надійшла (received) 28.02.2017