

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-3-193–199

УДК 621.793.71

Технологические особенности формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония

Асп. В. В. Оковитый¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девоино¹⁾, канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾, докт. физ.-мат. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси В. М. Асташинский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Разработана технология формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония, исследованы структуры фазового состава и термостойкости таких покрытий. Приведены результаты исследования процесса формирования оксидной системы $ZrO_2 - Y_2O_3$ методами плазменного напыления и последующей высокотемпературной обработки, позволяющей повысить стойкость теплозащитного покрытия к термоциклированию при температуре 1100 °С. Это приводит к более длительной защите подложки от воздействий высоких температур. Методика основана на комплексных металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследованиях структурных элементов композиционных плазменных покрытий системы $ZrO_2 - Y_2O_3$. Стойкость плазменных покрытий типа $Me - Cr - Al - Y/ZrO_2 - Y_2O_3$, применяемых в качестве теплозащитных покрытий для защиты лопаток газотурбинных двигателей в условиях частых теплосмен, ограничивается скалыванием внешнего керамического слоя. Структурные и микрорентгеноспектральные исследования показали, что в результате термоциклирования внешняя атмосфера благодаря пористой структуре керамического слоя покрытия проникает к поверхности нижнего металлического покрытия, вызывая его окисление. В результате на границе металл – керамика формируется слой Al_2O_3 , изменяющий напряженное состояние покрытия, что приводит к снижению защитных свойств. Таким образом, высокая термостойкость теплозащитных покрытий зависит от процессов, протекающих на границе между металлическим и керамическим слоями покрытия. Лазерное воздействие на образцы с теплозащитными покрытиями приводит к изменению структуры оксидного слоя $ZrO_2 - Y_2O_3$. При этом его исходная поверхность, характеризующаяся развитым рельефом, в результате обработки существенно выравнивается и покрытие растрескивается, разделяясь на фрагменты. Так как оксидное покрытие обладает низкой теплопроводностью, а время воздействия лазера порядка 10^{-3} с, тепловой поток не успевает распространиться на большую глубину. В результате поверхность покрытия приобретает вид застывшего расплава. Покрытие, полученное из порошка $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ по разработанной авторами технологии, выдерживает в 1,5 раза больше циклов нагрева – охлаждения, чем подобное покрытие, изготовленное ранее. Предложенный способ позволяет повысить стойкости покрытия к термоциклированию при температуре 1100 °С.

Ключевые слова: плазменные теплозащитные покрытия, диоксид циркония, оптимизация процесса, структура покрытия, фазовый состав, термостойкость

Для цитирования: Технологические особенности формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония / В. В. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 3. С. 193–199

Technological Peculiarities in Formation of Thermal Barrier Coatings Based on Zirconium Dioxide

V. V. Okovity¹⁾, O. G. Devoino¹⁾, V. A. Okovity¹⁾, V. M. Astashinsky¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A technology for formation of thermal barrier coatings (TBC) based on zirconium dioxide has been developed in the paper. The paper investigates structures of phase composition and thermal stability of such developed coatings. Investiga-

Адрес для переписки
Оковитый Василий Вячеславович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-45
vasil_ok@inbox.ru

Address for correspondence
Okovity Vasilii V.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-45
vasil_ok@inbox.ru

tion results pertaining to formation of an oxide system $ZrO_2 - Y_2O_3$, while using plasma spraying and subsequent high-energy processing, which allows to increase resistance of a thermal barrier coating to thermal cycling heat resistance of the coating at temperature of 1100 °C. This leads to longer protection of bottom layer against high-temperature exposure. The methodology is based on complex metallographic, X-ray diffraction and electron microscopy investigations of structural elements in composite plasma coatings of the $ZrO_2 - Y_2O_3$ system. Resistance of plasma coatings (Me – Cr – Al – Y/ $ZrO_2 - Y_2O_3$ -type), used as TBC to protect gas turbine engine blades under conditions of frequent thermal cyclings is limited by cleavage of an outer ceramic layer. Structural and electron microprobe investigations have shown that as a result of thermal cycling an outer atmosphere due to porous structure of the ceramic coating layer, migrates to the surface of lower metal coating, causing its oxidation. As a result, the metal-ceramic Al_2O_3 layer is formed at a metal-ceramic interface and it changes a stress state of the coating that causes a reduction of protective properties. Thus, a high heat resistance of thermal barrier coatings depends on processes occurring at the interface between metal and ceramic coating layers. A laser impact on samples with TBC leads to changes in the structure of the oxide layer of $ZrO_2 - Y_2O_3$. In this case its initial surface characterized by considerable relief is significantly flattened due to processing and the coating is fractured and it is separated in fragments. As the oxide coating has low thermal conductivity, and the time of laser exposure is about 10^{-3} sec, a heat flux does not have time to spread to a greater depth. As a result, the coating surface takes the form of solidified melt. The coating obtained from the powder of $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ in accordance with the developed technology can withstand heating – cooling cycles by 1.5-fold more than similar coatings being made previously. Thus the proposed method allows to increase the coating resistance to thermal cycling at temperatures of 1100 °C.

Keywords: plasma thermal barrier coatings, zirconium dioxide, process optimization, coating structure, phase composition, heat resistance

For citation: Okovity V. V., Devoino O. G., Okovity V. A., Astashinsky V. M. (2016) Technological Peculiarities in Formation of Thermal Barrier Coatings Based on Zirconium Dioxide. *Science & Technique*. 15 (3), 193–199 (in Russian)

Введение

Дальнейшее увеличение температуры рабочих газов, усложнение конструкций деталей авиационной техники привели к созданию многослойных теплозащитных покрытий (ТЗП) типа $ZrO_2 - Y_2O_3 - Me - Cr - Al - Y$. К таким покрытиям предъявляется ряд жестких требований: они должны быть газонепроницаемы в условиях эксплуатации; выдерживать многократные циклы теплосмен; минимизировать взаимную диффузию элементов покрытия и подложки; обеспечивать адгезию покрытия с основой [1–3]. Способами формирования данных покрытий являются лазерное напыление и лазерное оплавление [4]. Лазер как источник энергии имеет свои особенности и преимущества при обработке газотермических покрытий: высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют обрабатывать только поверхностный участок покрытия без нагрева всего объема и нарушения его структуры и свойств; возможность управления параметрами лазерного воздействия обеспечивает регулирование структуры поверхностного слоя, его твердости, шероховатости, износостойкости, геометрических размеров обработанных участков и др. Лазерная обработка приводит к значительному уплотнению внешнего слоя покрытия, устраня-

ет пористость в поверхностном слое, снижает шероховатость и соответственно неравномерность нагрева покрытия [5–7]. Однако следует учитывать, что лазерная обработка способствует перераспределению и изменению напряжений в покрытии, тем более существенному, чем выше мощность излучения и меньше толщина покрытия. Поэтому требуется оптимизация режимов обработки. Актуальность применения лазерной обработки плазменных ТЗП подтверждается рядом работ по данной тематике [8–10].

Формирование плазменных теплозащитных покрытий

При плазменном напылении с охлаждением при расходе сжатого воздуха 1 м³/мин, давлении $p = 4$ атм и значении тока 400 А в ТЗП формируется максимальное количество тетрагональной фазы (98 %) (рис. 1). Это соответствует максимальной термостойкости (рис. 2). При отсутствии охлаждения в покрытии появляется кубическая фаза (рис. 3), ухудшающая термостойкость. Влияние тока и размера частиц порошка на фазовый состав показано на рис. 4. При увеличении размера фракции с <50 мкм до 100–160 мкм в покрытии уменьшится количество тетрагональной фазы, приводящее к ухудшению термостойкости.

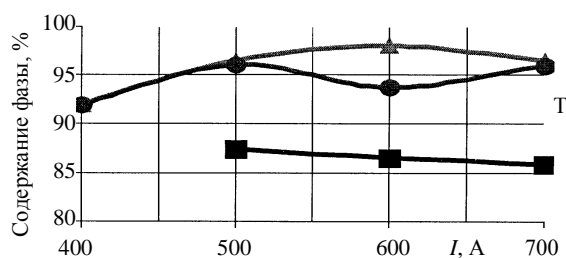


Рис. 1. Влияние величины тока дуги плазматрона и степени охлаждения на фазовый состав $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ покрытия (Т – тетрагональная фаза) при дистанции напыления $L = 110$ мм; расходе водорода $R_{H_2} = 8$ л/мин; ● – расход сжатого воздуха $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$, давление сжатого воздуха $p = 6$ атм; ▲ – расход сжатого воздуха $1,0 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 4$ атм; ■ – без охлаждения (размер частиц порошка < 50 мкм)

Fig. 1. Influence of plasmatron arc current value and cooling rate on phase composition of $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ coating (Т – tetragonal phase) for spraying distance $L = 110$ mm; hydrogen consumption $R_{H_2} = 8$ l/min; ● – compressed air consumption $1.5 \text{ м}^3/\text{мин}$, compressed air pressure $p = 6$ atm; ▲ – compressed air consumption $1.0 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 4$ atm; ■ – without cooling (powder size $< 50 \text{ μm}$)

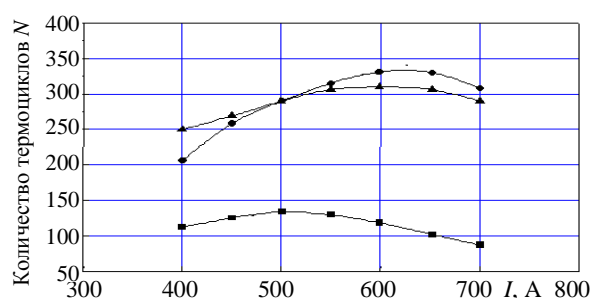


Рис. 2. Влияние тока на стойкость к термоциклированию при напылении ТЗП на основе ZrO_2 при $L = 110$ мм, $R_{H_2} = 8$ л/мин: ● – расход сжатого воздуха $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 6$ атм; ▲ – $1,0 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 4$ атм; ■ – без охлаждения (размер частиц порошка < 50 мкм)

Fig. 2. Influence of current on resistance to thermal cycling while spraying TBC on the basis of ZrO_2 for $L = 110$ mm, $R_{H_2} = 8$ l/min:

- – compressed air consumption $1.5 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 6$ atm;
- ▲ – $1.0 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 4$ atm;
- – without cooling (powder size $< 50 \text{ μm}$)

Лазерное воздействие на плазменные теплозащитные покрытия

Стойкость плазменных покрытий типа $Me-Cr-Al-Y/ZrO_2-Y_2O_3$, применяемых в качестве ТЗП для защиты лопаток газотурбинных двигателей в условиях частых теплосмен, ограничивается скалыванием внешнего керамического слоя. Структурные и микрорентгеноспек-

тральные исследования показали, что в результате термоциклирования внешняя атмосфера благодаря пористой структуре керамического слоя покрытия проникает к поверхности нижнего металлического покрытия, вызывая его окисление.

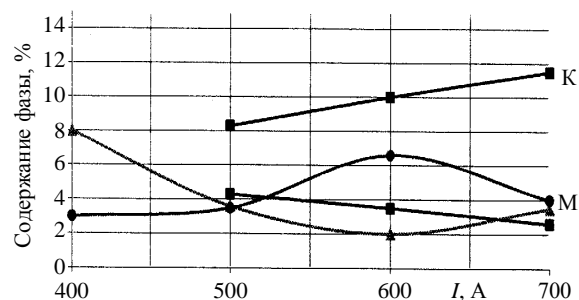


Рис. 3. Влияние величины тока дуги плазматрона и степени охлаждения на фазовый состав $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ покрытия: М – моноклинная фаза; К – кубическая фаза (параметры напыления те же, что на рис. 2)

Fig. 3. Influence of plasmatron arc current value and cooling rate on phase composition of $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ coating: М – monoclinic phase; К – cubic phase (spraying parameters are the same as on Fig. 2)

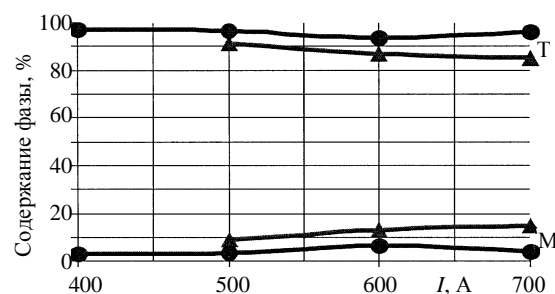


Рис. 4. Влияние тока и размера частиц порошка на фазовый состав при напылении ТЗП на основе ZrO_2 : $R_{H_2} = 8$ л/мин; расход аргона $R_{Ar} = 30$ л/мин; $L = 110$ мм; расход порошка $R_{пор} = 2$ кг/ч; ● – $< 50 \text{ μm}$; ▲ – $50-63 \text{ μm}$

Fig. 4. Influence of current and powder size on phase composition while spraying TBC on the basis of ZrO_2 : $R_{H_2} = 8$ l/min; argon consumption $R_{Ar} = 30$ l/min; $L = 110$ mm; powder consumption $R_{пор} = 2$ kg/h; ● – $< 50 \text{ μm}$; ▲ – $50-63 \text{ μm}$

В результате на границе металл – керамика формируется слой Al_2O_3 , изменяющий напряженное состояние покрытия, что приводит к снижению защитных свойств. Таким образом, высокая термостойкость теплозащитных покрытий зависит от процессов, протекающих на границе между металлическим и керамическим слоями покрытия. Лазерное воздействие на образцы с ТЗП способствует изменению структуры оксидного слоя $ZrO_2-Y_2O_3$. При этом его исходная поверхность, характери-

зующаяся развитым рельефом, в результате обработки существенно выравнивается, и покрытие растрескивается, разделяясь на фрагменты. Так как оксидное покрытие обладает низкой теплопроводностью, а время воздействия лазера порядка 10^{-3} с, тепловой поток не успевает распространиться на большую глубину. В результате поверхность покрытия приобретает вид застывшего расплава. Условия лазерной обработки представляют собой высокоскоростной тепловой удар с последующим быстрым охлаждением поверхности. Вследствие этого создаются значительные термические напряжения, которые, очевидно, и являются причиной фрагментации поверхности. Как показали исследования, ширина возникающих при обработке импульсным CO_2 -лазером с длиной волны 9,25 мкм и плотностью энергии импульса от 800 до 2000 кДж/м² трещин не превышает 0,5–1,0 мкм, а глубина 8–10 мкм. Появившаяся на поверхности покрытия трещина при распространении вглубь теряет энергию, разделяется на несколько каналов, на расстоянии 8–10 мкм от поверхности прекращает свой рост. В большинстве случаев глубина трещины меньше трансформируемого слоя. Поэтому обработанное покрытие становится как бы загерметизированным (рис. 5). Однако наличие отдельных сквозных трещин на всю глубину трансформированного слоя несколько снижает этот эффект (рис. 6). При увеличении плотности энергии импульса более 2000 Дж/см² в покрытии появляются крупные сферические поры и полости (рис. 7). Они концентрируются в основном вблизи кратера, образующегося под воздействием одиночного импульса.

В покрытии до обработки лазером (после плазменного напыления) образуется 6,6 % моноклинной модификации (рис. 8а), остальное – практически тетрагональный диоксид циркония (17-923 – номер карты по картотеке ASTM), в котором при тонких исследованиях структуры можно обнаружить включения сложного оксида с формулой $\text{Zr}_3\text{Y}_4\text{O}_{12}$ (29-1389). Линии кубической модификации ZrO_2 на дифрактометре отсутствуют, а линии тетрагональной модификации заметно смещены в сторону увеличения параметров решетки.

После обработки импульсным лазером с $\lambda = 9,25$ мкм и плотностью энергии импульса 1000 кДж/м² в покрытии образуется сильно измельченная структура, исчезает моноклинная модификация ZrO_2 (рис. 8б). Фактически получается 100%-я тетрагональная модификация, причем линии тетрагонального ZrO_2 смещаются в сторону уменьшения параметров решетки. При этом происходит выравнивание концентрации оксида иттрия в объеме покрытия (в структуре отсутствуют обогащенные оксидом иттрия темные области). Вероятно, быстрое охлаждение покрытий после лазерной обработки подавляет диффузионные процессы, приводящие к перераспределению оксида иттрия. Идентифицируется также сложный оксид, но уже с другой формулой $\text{Y}_{0,15}\text{Zr}_{0,85}\text{O}_{1,93}$ (30-1468). Наличие и количественное содержание кубической модификации ZrO_2 обычно изучают в интервале $2\theta = 72^\circ\text{--}76^\circ$ (линия (400) с учетом анализа профиля линий (004) и (400) тетрагональной фазы).

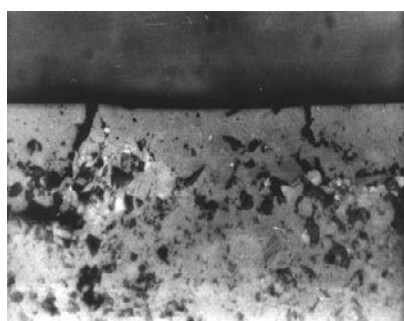


Рис. 5. Структура ТЗП после обработки импульсным CO_2 -лазером с длиной волны $\lambda = 9,25$ мкм и плотностью энергии импульса 1000 кДж/м² (×500)

Fig. 5. TBC structure after processing by impulse CO_2 -laser with wave length $\lambda = 9.25 \mu\text{m}$ and density of impulse energy 1000 kJ/m² (×500)

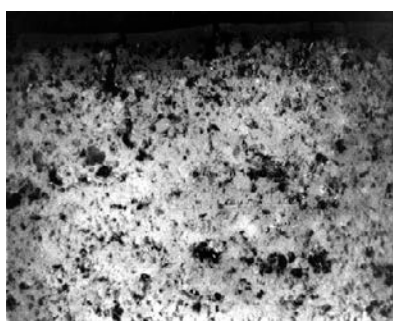


Рис. 6. Структура ТЗП после обработки импульсным CO_2 -лазером с $\lambda = 9,25$ мкм и плотностью энергии импульса 1500 кДж/м² (×500)

Fig. 6. TBC structure after processing by impulse CO_2 -laser with wave length $\lambda = 9.25 \mu\text{m}$ and density of impulse energy 1500 kJ/m² (×500)

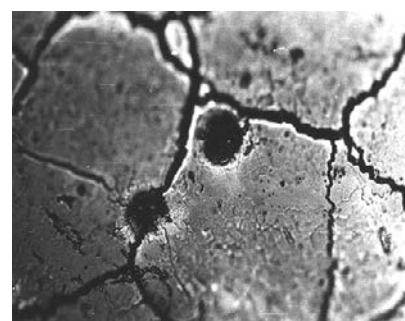


Рис. 7. Структура ТЗП после обработки импульсным CO_2 -лазером с $\lambda = 9,25$ мкм и плотностью энергии импульса 2000 кДж/м² (×500)

Fig. 7. TBC structure after processing by impulse CO_2 -laser with wave length $\lambda = 9.25 \mu\text{m}$ and density of impulse energy 2000 kJ/m² (×500)

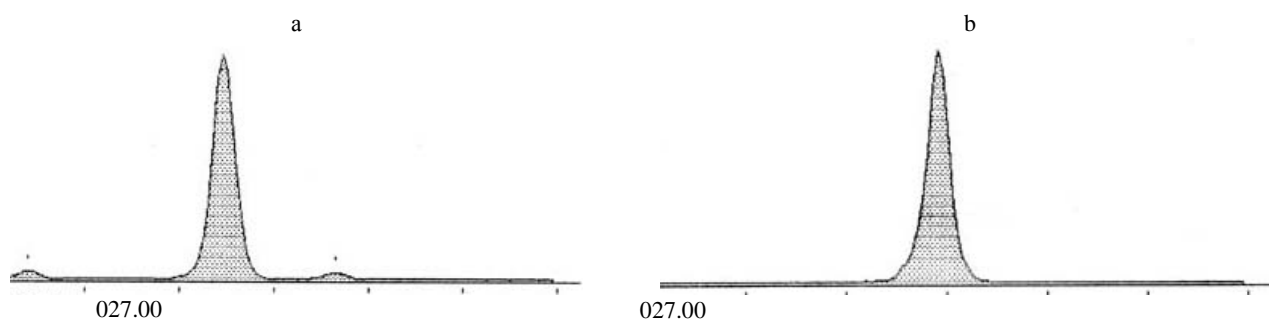


Рис. 8. Дифрактограмма в характерных областях съемки для разделения фаз:
а – после плазменного напыления, $2\theta = 27^\circ\text{--}33^\circ$; б – после обработки импульсным лазером

Fig. 8. Diffractogram in characteristic exposure zones for phase separation:
а – after plasma spraying, $2\theta = 27^\circ\text{--}33^\circ$; б – after processing by impulse laser

Результаты исследований, выполненных с помощью программы разделения наложенных линий SPLEET.LINE, позволяют идентифицировать только линии тетрагональной модификации (рис. 9а). Анализ профиля линий с учетом дуплетности также подтверждает отсутствие кубической фазы в обработанных покрытиях (рис. 9б).

Технология нанесения плазменных теплозащитных покрытий

На торцевую поверхность образцов из сплава ЖС-30 диаметром 20 мм и толщиной 10 мм наносили ТП. Нанесение подслоя для прототипа и заявляемого способа выполняли при одинаковых режимах на установке вакуумного плазменного напыления VPS фирмы «Плазма-Техник». Перед нанесением покрытия торцевые поверхности образцов подвергали струйно-абразивной обработке карбидом кремния с последующей очисткой от остатков абразива на ультразвуковой установке в среде этилового спирта. Рабочую камеру предварительно ваку-

умировали до давления 10^{-4} Бар, потом заполняли аргоном до давления $2 \cdot 10^{-2}$ Бар. Затем проводили ионную очистку и нагрев образцов до $750\text{--}800^\circ\text{C}$. После очистки и нагрева образцов наносили подслои толщиной 0,1 мм из порошков сплава на основе Co с 10 % Ni, 25 % Cr, 6 % Al, 5 % Ta, 0,6 % Y. Режим нанесения подслоя: ток электрической дуги 730 А; напряжение дуги 65 В; давление в камере $5 \cdot 10^{-2}$ бар; расход водорода 10 л/мин; расход аргона 50 л/мин; расход порошка 2,0 кг/ч; расход транспортирующего газа (аргон) 2 л/мин; дистанция напыления 350 мм.

После нанесения подслоя проводили напыление керамического покрытия из порошков частично стабилизированного диоксида циркония состава $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ с изменением пористости по толщине покрытия в направлении от наружной поверхности слоя к подслою от 3–5 до 15–18 %. Покрытия наносили на две группы образцов, по пять образцов в каждой группе (одна группа по известному [11], вторая – по разработанному авторами способу).

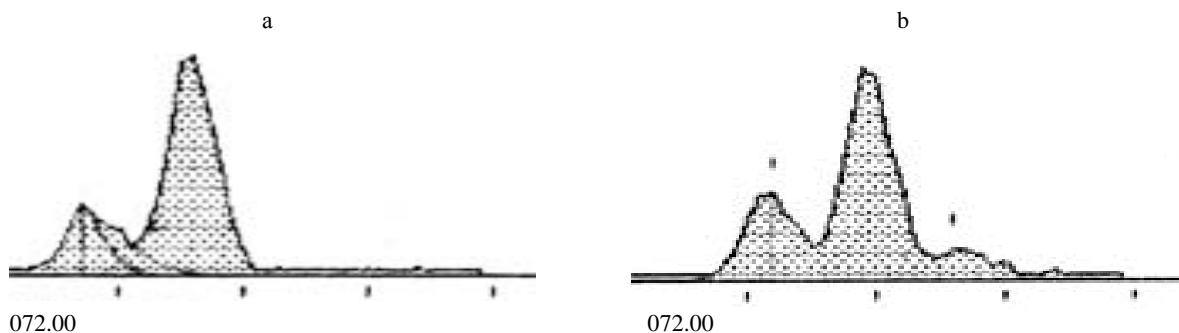


Рис. 9. Дифрактограмма в характерных областях съемки для разделения фаз:
а – после плазменного напыления, $2\theta = 72^\circ\text{--}76^\circ$; б – после обработки импульсным лазером

Fig. 9. Diffractogram in characteristic exposure zones for phase separation:
а – after plasma spraying, $2\theta = 72^\circ\text{--}76^\circ$; б – after processing by impulse laser

Образцы по прототипу после нанесения под-слоя и слоя покрытия спекали в нейтральной атмосфере. Перед спеканием производили нагрев покрытия до температуры начала $m-t$ -фазового моноклинно-тетрагонального перехода, затем осуществляли окислительный отжиг. Данные технологические операции выполняли для обеспечения фиксации в поверхностном слое покрытия метастабильной тетрагональной фазы ZrO_2 , которая значительно увеличивает вязкость разрушения покрытия. Покрытия по разработанному способу наносили при режимах напыления керамического слоя ТЗП, позволяющих сформировать в покрытии до 98 % тетрагональной фазы: ток дуги 600 А; расход водорода 8 л/мин; расход аргона 30 л/мин; дистанция напыления 110 мм; расход порошка 2 кг/ч; расход сжатого воздуха для охлаждения ТЗП 1 м³/мин; давление сжатого воздуха $p = 4$ атм; фракция порошка <50 мкм. Для обработки ТЗП использовали импульсно-периодический CO_2 -лазер с длиной волны 9,25 мкм, плотностью энергии импульса от 1000 до 1500 кДж/м². Обработку образцов лазером проводили с помощью ЭВМ, управляющей механизмом перемещения с двумя степенями свободы. Применение компьютера позволяет автоматически обрабатывать поверхность образ-

ца, установить требуемые размеры обрабатываемой поверхности и степень совмещения линий (дорожек). Обработанные образцы охлаждали сжатым воздухом до температуры, ниже начала фазового $m-t$ -перехода, что приводит к закалке и фиксации в поверхностном слое мелкодисперсной тетрагональной фазы ZrO_2 . После нанесения слоя покрытия подвергали циклическому тестированию в печи при температуре 1100 °С. Температуру в печи замеряли платиновой термопарой и поддерживали в пределах (1100 ± 8) °С. Стойкость покрытий к термоциклированию определяли по количеству термоциклов, которые выдерживали образцы до разрушения слоя керамического покрытия. Цикл состоял из: нагрева в течение 10 мин, выдержки при 1100 °С в течение 60 мин и 60-минутного охлаждения при 300 °С. В течение каждого 10 циклов образцы извлекались из печи для проверки, когда температура опускалась до 300 °С. Испытания продолжались до разрушения керамического покрытия, за которое принимали формирование трещины, видимой невооруженным взглядом. Сравнительные данные испытаний покрытий, полученных по [8] и разработанному авторами способу, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние способа получения ТЗП из частично стабилизированного диоксида циркония на фазовый состав покрытий и стойкость к термоциклированию
Influence of method for obtaining of TBC from partially stabilized zirconium dioxide on phase composition of coatings and resistance to thermal cycling

Химический состав материала	Метод получения покрытия	Содержание фазы, %*			Количество термоциклов
		моноклинной	тетрагональной	кубической	
$ZrO_2 - 7 \text{ \% мас. \% } Y_2O_3$	[8]	2,0/4,0	96,9/78,9	1,1/17,1	520
$ZrO_2 - 7 \text{ \% мас. \% } Y_2O_3$	[7]	–/6,1	98,9/93,9	1,1/–	760

*Фазовый состав плазменных покрытий до/после термоциклирования.

ВЫВОД

В покрытии до обработки лазером образуется 6,6 % моноклинной модификации, остальное – практически тетрагональный диоксид циркония, в котором при исследовании структуры можно обнаружить включения сложного оксида с формулой $Zr_3Y_4O_{12}$. Линии кубической модификации ZrO_2 на дифрактометре отсутствуют, а линии тетрагональной модификации заметно смещены в сторону увеличения пара-

метров решетки. После обработки импульсным лазером с длиной волны $\lambda = 9,25$ мкм и плотностью энергии импульса 1000 кДж/м² в покрытии образуется сильно измельченная структура, исчезает моноклинная модификация ZrO_2 , фактически получается 100%-я тетрагональная модификация. Причем линии тетрагонального ZrO_2 смещаются в сторону уменьшения параметров решетки. Покрытие, полученное из порошка $ZrO_2 - 7 \text{ \% } Y_2O_3$ по разработанному авторами способу, выдерживает в 1,5 раза больше

циклов нагрева – охлаждения, чем подобное покрытие, изготовленное ранее. Таким образом, предложенный способ позволяет повысить стойкости покрытия к термоциклированию при температуре 1100 °С, что приводит к более длительной защите подложки от воздействий высоких температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стернс, К. А. Теплозащитные покрытия / К. А. Стернс // Аэрокосмическая техника. 1997. № 10. С. 144–164.
2. Ильюшенко, А. Ф. Плазменные покрытия на основе керамических материалов / А. Ф. Ильюшенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. Минск: Беспринт, 2006. 316 с.
3. Ruckle, D. L. Plasma-Sprayed Ceramic Thermal Barrier Coatings for Turbine Vane Platforms / D. L. Ruckle // *Thin Solid Films*. 1990. Vol. 73, No 2. P. 455–461.
4. Оковитый, В. А. Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия. 1998. Вып. 21. С. 101–105.
5. Lujtscheider, E. Laser Remelting of Thermally Sprayed Coatings / E. Lujtscheider // *Laser Treat. Mater. Eur. Conf. Bad Nauheim*. 1997. P. 445–450.
6. Григорянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорянц. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
7. Laser Treatment of Plasma-Sprayed Coatings / H. Bhat [et al.] // 10th Int. Thermal Spraying Conf. Essen: DVS-Berichte, 1983. Vol. 80. P. 21–23.
8. Bhat, H. Laser-Treated Plasma-Sprayed Ni-Base Alloy Coatings / H. Bhat, H. Herman, R. J. Coyle // *High Temperature Protective Coatings. Proc. 112th AIME Annual Meeting, Atlanta, 7–8 May 1983*. P. 37–50.
9. Longa, Y. The Yttrium Effect on the Corrosion Resistance of CO₂-Laser Processed MCrAlY Coatings / Y. Longa, M. Takemoto // *Oxidation of Metals*. 1994. Vol. 41, No 5–6. P. 301–321.
10. Lugshader, E. Laser Treatment of CoNiAlY VPS Coatings / E. Lugshader // 8nd Plasma-Technik Symposium: Proc. Sump. 2001. Vol. I. P. 323–345.
11. Способ получения теплозащитного покрытия: пат. 2979 Респ. Беларусь, МКИ4 С 23 С 4/12, 4/10 / В. А. Оковитый, А. Ф. Ильюшенко, С. Б. Соболевский, В. С. Ивашко; дата публ. 20.11.1999.

Поступила 27.10.2015

Подписана в печать 28.12.2015

Опубликована онлайн 24.05.2016

REFERENCES

1. Stearns K. A. (1997) Thermal Barrier Coatings. *Aerokosmicheskaya Tekhnika* [Aerospace], (10), 144–164 (in Russian).
2. Ilyushchenko A. F., Okovity V. A., Shevtsov A. I. (2006) *Plasma Coatings Based on Ceramic Materials*. Minsk, Besprint. 316 (in Russian).
3. Ruckle D. L. (1980) Plasma-Sprayed Ceramic Thermal Barrier Coatings for Turbine Vane Platforms. *Thin Solid Films*, 73 (2), 455–461. DOI: 10.1016/0040-6090(80)90514-3.
4. Okovity V. A. (1998) Influence of Technological Parameters of the Ceramic Layer in Thermal Barrier Coating on Resistance to Thermal Cycling. *Poroshkovaya Metallurgiya* [Powder Metallurgy], 21, 101–105 (in Russian).
5. Lujtscheider E. (1997) *Laser Remelting of Thermally Sprayed Coatings*. Laser Treat. Mater. Eur. Conf. Bad Nauheim, 445–450.
6. Grigoryants A. G. (1989) *Fundamentals of Laser Material Treatment*. Moscow, Mashinostroyeniye. 304 (in Russian).
7. Bhat H., Zatorski R. A., Herman H., Coyle R. J. (1983) Laser Treatment of Plasma-Sprayed Coatings. 10th Int. Thermal Spraying Conf. Essen, DVS-Berichte, 80, 21–23.
8. Bhat H., Herman H., Coyle R. J. Laser-Treated Plasma-Sprayed Ni-Base Alloy Coatings. *High Temperature Protective Coatings. Proc. 112th AIME Annual Meeting, Atlanta, 7–8 May 1983*, 37–50.
9. Longa Y., Takemoto M. (1994) The Yttrium Effect on the Corrosion Resistance of CO₂-Laser Processed MCrAlY Coatings. *Oxidation of Metals*, 41 (5–6), 301–321. DOI: 10.1007/BF01113368.
10. Lugshader E. (2001) Laser Treatment of CoNiAlY VPS Coatings. 8nd Plasma-Technik Symposium: Proc. Sump. Vol. I. Wohlen, Switzerland, 323–345.
11. Okovity V. A., Ilyushchenko A. F., Sobolevski S. B., Ivashko V. S. (1999) *Method for Obtaining a Thermal Barrier Coating*. Patent Republic of Belarus no 2979 (in Russian).

Received: 27.10.2015

Accepted: 28.12.2015

Published online: 24.05.2016