

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185>

УДК 621.793.7:621.762

## Аспекты создания многослойных покрытий методом плазменного напыления

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук В. А. Оковитый<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно<sup>1)</sup>,  
инженеры А. А. Литвинко<sup>1)</sup>, В. В. Оковитый<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский<sup>2)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. В. М. Блюменштейн<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Кемерово,  
Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** В работе с учетом состояния вопроса в области нанесения многослойных теплозащитных и износостойких покрытий обоснованы направления исследований. Задачами разработки являются: совершенствование порошковых материалов, содержащих частично стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония для плазменного нанесения теплозащитных покрытий; совершенствование порошковых материалов, содержащих оксидную керамику и сплавы на основе никеля для плазменного нанесения износостойких покрытий; отработка технологических параметров плазменного напыления и последующей обработки воздействиями на покрытие компрессионной плазмы; анализ качества полученных по оптимальной технологии защитных покрытий путем исследования их структуры и физико-механических свойств. Частицы  $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$  содержат преобладающую тетрагональную фазу  $Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{0,93}$ , моноклинную и кубическую фазы  $ZrO_2$ , а композиция  $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$  содержит способствующие ее износостойкости фазы  $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$  твердого раствора на основе никеля, фазы  $\alpha-Al_2O_3$ ,  $\gamma-Al_2O_3$ , орторомбическую фазу оксида титана  $TiO_2$ . Исследованы с последующей оптимизацией технологические параметры для процесса плазменного напыления многослойных теплозащитных и износостойких покрытий. Критериями оптимизации служили коэффициент использования напыляемого порошкового материала и структура покрытий. Исследовано влияние дистанции напыления на значения эксплуатационных характеристик сформированных плазменных покрытий на  $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$ . Приведены полученные результаты регулирования фазового состава покрытий с помощью варьирования химического состава порошковых материалов, отличия в фазовом составе сформированного материала тем значительнее, чем более неоднородно распределение элементов в исходном порошковом материале. Проведены испытания на циклическое тестирование в печи при максимальной температуре в пределах 1300 °С теплозащитных покрытий для выявления их термостойкости. Они доказали влияние фазового состава сформированных покрытий на их способность противостоять высокотемпературному окислению.

**Ключевые слова:** плазменный процесс, многослойность, теплозащита, износостойкость, оптимизация режимов, эксплуатационные характеристики, циклическое тестирование, параметры процесса, структура покрытий

**Для цитирования:** Аспекты создания многослойных покрытий методом плазменного напыления / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 179–185. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185>

### Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 22,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-71  
nii\_svarka@bntu.by

### Address for correspondence

Okovity Vjacheslav A.  
Belarusian National Technical University  
22, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-71  
nii\_svarka@bntu.by

## Aspects of Creating Multilayer Coatings by Plasma Spraying Method

F. I. Panteleenko<sup>1</sup>, V. A. Okovity<sup>1</sup>, O. G. Devoino<sup>1</sup>, A. A. Litvinko<sup>1</sup>, V. V. Okovity<sup>1</sup>,  
V. M. Astashinsky<sup>2</sup>, V. M. Blumenstein<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>3</sup>Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev

**Abstract.** In the work, taking into account the state of the issue in the field of applying multilayer heat-shielding and wear-resistant coatings, directions of research are substantiated. The objectives of the development are: improvement of powder materials containing zirconium dioxide partially stabilized with yttrium oxide for plasma deposition of heat-shielding coatings; improvement of powder materials containing oxide ceramics and nickel-based alloys for plasma deposition of wear-resistant coatings; development of technological parameters of plasma spraying and subsequent processing by the effects of compression plasma on the coating; analysis of the quality of protective coatings obtained using the optimal technology by studying their structure and physical and mechanical properties. The  $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$  particles contain the predominant tetragonal  $Y_{0.15}Zr_{0.85}O_{0.93}$  phase, monoclinic and cubic  $ZrO_2$  phases, and the  $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$  composition contains the  $Cr_{1.12}Ni_{2.88}$  phase of the nickel-based solid solution, the  $\alpha-Al_2O_3$ ,  $\gamma-Al_2O_3$  phases, and the orthorhombic phase of titanium oxide  $TiO_2$  that contribute to its wear resistance. subsequent optimization of technological parameters for the process of plasma spraying of multilayer heat-shielding and wear-resistant coatings. Technological parameters for the process of plasma spraying of multi-layer heat-shielding and wear-resistant coatings are investigated with subsequent optimization. The optimization criteria were the utilization factor of the sprayed powder material and the structure of the coatings. The influence of the spraying distance on the values of operational characteristics of the formed plasma coatings on  $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$  has been studied. The obtained results of controlling the phase composition of coatings by varying the chemical composition of powder materials are presented. In the process of deposition, the differences in the phase composition of the formed material are the more significant, the more inhomogeneous the distribution of elements in the initial powder material. Tests have been carried out for cyclic testing in an oven at a maximum temperature within 1300 °C of heat-shielding coatings to determine their heat resistance. They proved the influence of the phase composition of the formed coatings on their ability to withstand high-temperature oxidation.

**Keywords:** plasma process, layering, thermal protection, wear resistance, optimization of modes, operational characteristics, cyclic testing, process parameters, coating structure

**For citation:** Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Litvinko A. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Blumenstein V. M. (2023) Aspects of Creating Multilayer Coatings by Plasma Spraying Method. *Science and Technique*. 22 (3), 179–185. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-179-185> (in Russian)

### Введение

Одним из способов для эффективной защиты деталей от износа, коррозии и окисления является создание на их поверхности плазменных многослойных керамических покрытий. Для получения качественных эксплуатационных характеристик такие покрытия должны обладать максимально равномерным и плавным переходом свойств (общая и открытая пористость, микротвердость и твердость, характеристики модулей упругости) от применяемой основы к внешнему сформированному керамическому слою. Данные многослойные защитные покрытия состоят из подслоев на основе никелевых или кобальтовых металлических сплавов, внешних слоев на базе оксидной керамики и нескольких переходных с плавным изменением металлического и керамического компонента. Последующее их разрушение во время эксплуатации связано с термомеханическими напряжениями, вызываемыми различиями параметров термического расширения металлических суперсплавов основы и сформированных керамических слоев. Дополнительная

причина кроется в неравномерности при распределении температурных полей в структуре покрытия. Взаимодействие остаточных напряжений усиливает эффект термомеханических. Применение тщательно подобранных подслоев способствует возрастанию пластичности и ползучести, а они соответственно ослабляют термомеханические напряжения. Преимущественное использование процессов плазменного напыления для генерирования защитных покрытий с многослойной системой связано с его достаточно высокой универсальностью, производительностью и технологичностью, позволяющими создавать строго определенные системы построения покрытий.

### Результаты исследований многослойных систем плазменных покрытий

Проведены исследования порошковых материалов для формирования плазменных многослойных систем теплозащитных и износостойких покрытий [1–3]. С применением сканирующей электронной микроскопии изучены форма, рельеф и размер частиц порошков, используемых для напыления покрытий. Уста-

новлено, что эти порошковые материалы характеризуются достаточно сложной формой и рельефом поверхности частиц. Размер гранул порошка диоксида циркония в свободно насыпанном состоянии и диспергированного в ультразвуке находится в пределах 10–70 и 5–60 мкм (рис. 1а). Для композиции 60 % (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>) – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta эти параметры имеют следующие значения: 10–100 и 0–5 мкм (рис. 1б). При обсчете частиц порошка с фотографий на анализаторе изображения определены их гранулометрический состав и средний максимальный диаметр частиц: для композиции ZrO<sub>2</sub> + 7 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> размер гранул составляет 38 мкм; для 60 % (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>) – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta их величина 44 мкм. Результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что частицы ZrO<sub>2</sub> – 7 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> содержат преобладающую

тетрагональную фазу Y<sub>0,15</sub>Zr<sub>0,85</sub>O<sub>0,93</sub>, моноклинную и кубическую фазы ZrO<sub>2</sub>, а композиция 60 % (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>) – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta содержит способствующие ее износостойкости фазу Cr<sub>1,12</sub>Ni<sub>2,88</sub> твердого раствора на основе никеля, фазы α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, орторомбическую фазу оксида титана TiO<sub>2</sub>.

Исследованы с последующей оптимизацией параметры, характеризующие технологию плазменного напыления многослойных теплозащитных и износостойких покрытий. Критериями оптимизации служили коэффициент использования порошка (КИП) (рис. 2, 3) и структура покрытий [4–7]. Для многослойного теплозащитного покрытия ZrO<sub>2</sub> – 7 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> учитывали также его стойкость к термоциклированию, выбирая режим с повышенной долговечностью нанесенного слоя.



Рис. 1. Морфология полученных порошковых материалов: а – ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученного химико-термическим методом; б – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub> – Ni–Cr–Al–Y–Ta после проведенного процесса сфероидизации (×500)

Fig. 1. Morphology of the obtained powder materials: а – ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtained by the chemical-thermal method; б – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub> – Ni–Cr–Al–Y–Ta after the spheroidization process (×500)

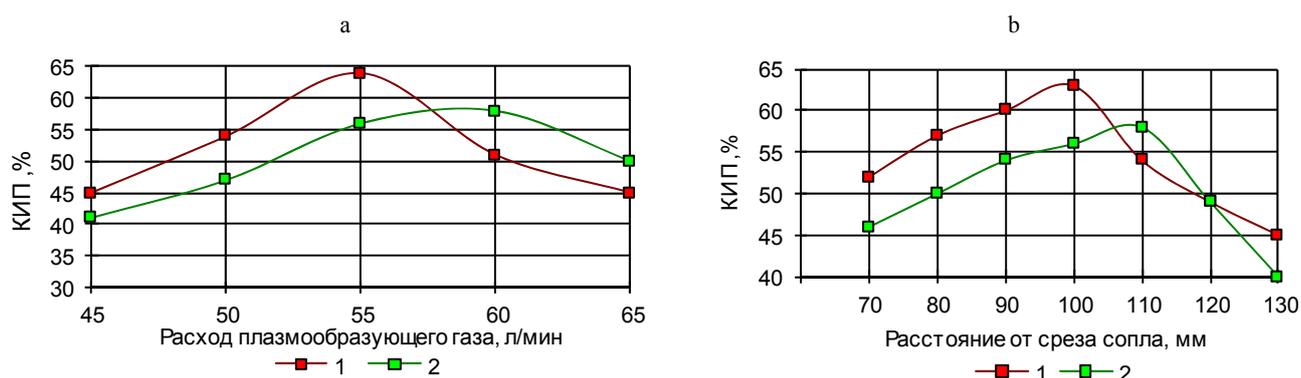


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования порошка ZrO<sub>2</sub>, % (1 – с фракцией <50 мкм; 2 – с фракцией 50–63 мкм) от: а – расхода плазмообразующего газа азота N<sub>2</sub> (дистанция при напылении L = 100 мм; ток подводимой дуги I = 500 А; расход порошкового материала R<sub>пор</sub> = 4,5 кг/ч); б – используемых дистанций при напылении L, мм (ток подводимой дуги I = 500 А, расход плазмообразующего газа азота R<sub>N<sub>2</sub></sub> = 50 л/мин, расход при подаче порошкового материала R<sub>пор</sub> = 4,5 кг/ч)

Fig. 2. Dependence of ZrO<sub>2</sub> powder utilization factor, % (1 – with fraction <50 μm; 2 – with fraction 50–63 μm) on: а – consumption of plasma-forming nitrogen N<sub>2</sub> (spraying distance L = 100 mm; supplied arc current I = 500 A; consumption of nitrogen plasma gas R<sub>N<sub>2</sub></sub> = 50 l/min, consumption of powder material R<sub>pow</sub> = 4.5 kg/h); б – used distances during spraying, L, mm (supplied arc current I = 500 A, consumption of plasma-forming nitrogen R<sub>N<sub>2</sub></sub> = 50 l/min, consumption of powder material R<sub>pow</sub> = 4.5 kg/h)

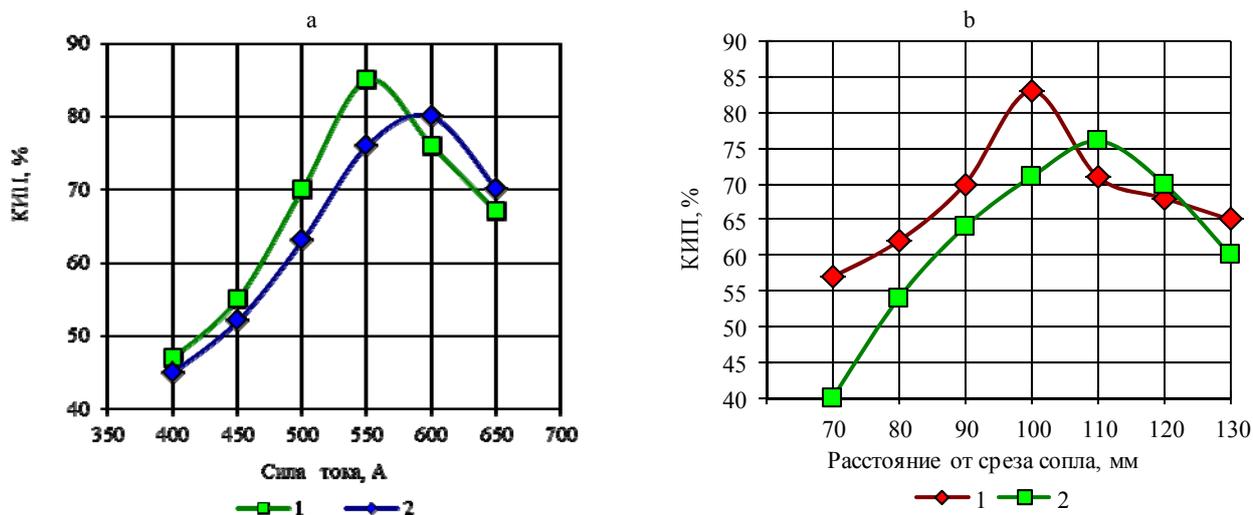


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ , % (1 – с фракцией <50 мкм; 2 – с фракцией 50–63 мкм) от: а – подводимого тока плазмоторна ( $I$ , А) ( $R_{\text{пор}} = 4,5$  кг/ч;  $R_{\text{N}_2} = 45$  л/мин;  $L = 100$  мм); б – дистанции при напылении  $L$ , мм ( $R_{\text{пор}} = 4,5$  кг/ч;  $R_{\text{N}_2} = 45$  л/мин;  $I = 550$  А)

Fig. 3. Dependence of the powder utilization factor of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ , % (1 – with fraction <50  $\mu\text{m}$ ; 2 – with fraction 50–63  $\mu\text{m}$ ): а – input current of the plasma torch ( $I$ , А) ( $R_{\text{por}} = 4.5$  kg/h;  $R_{\text{N}_2} = 45$  l/min;  $L = 100$  mm); б – spray distance  $L$ , mm ( $R_{\text{por}} = 4.5$  kg/h;  $R_{\text{N}_2} = 45$  l/min;  $I = 550$  A)

По результатам исследований режимов напыления выполнена их оптимизация [8–11]. После этого оптимизированным режимам соответствовали максимальные значения КИП, а пористость покрытий изменялась в более узких пределах: при напылении  $\text{ZrO}_2 + 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$  пористость 8–10 %; открытая по-

ристость 2,5–4,0 %; 60 % ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ) – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  пористость 5,1–7,5 %; открытая пористость 1,8–2,5 %. Исследовано влияние дистанции при напылении на значения эксплуатационных характеристик сформированных плазменных покрытий на  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (рис. 4).

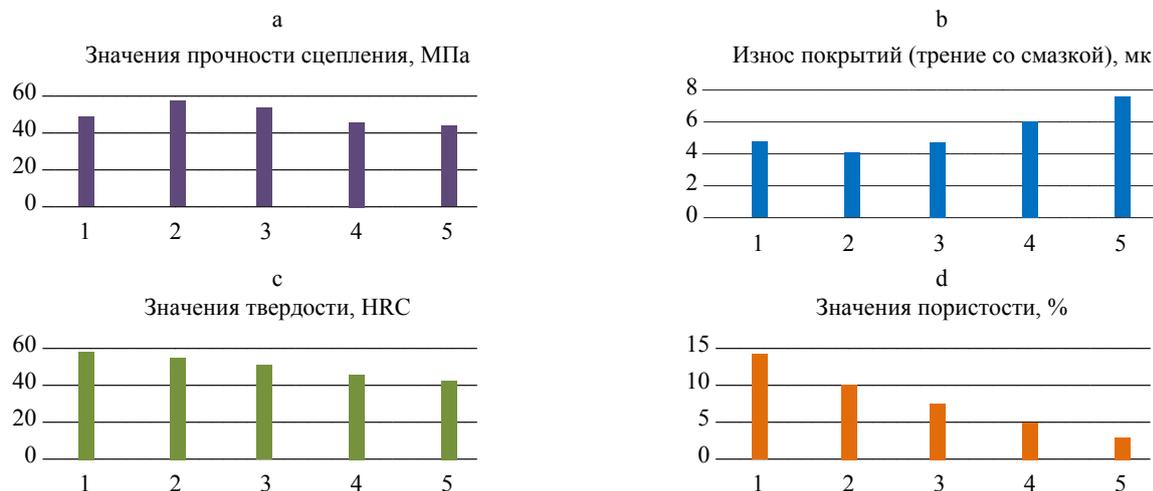


Рис. 4. Показатели характеристики сформированных износостойких покрытий: а – прочности сцепления; б – износостойкости; с – твердости; д – пористости (1 – 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 2 – 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 3 – 50 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 50 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 4 – 40 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 60 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 5 – 30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 70 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ )

Fig. 4. Indicators of the characteristics of the formed wear-resistant coatings: а – adhesion strength; б – wear resistance; с – hardness; д – porosity (1 – 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 2 – 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 3 – 50 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 50 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 4 – 40 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 60 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ ; 5 – 30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 70 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ )

В табл. 1 предоставлены данные анализа содержания элементов с площади  $10 \times 12$  мкм для  $ZrO_2-Y_2O_3$ , полученного химико-термическим способом. Фазовый состав сформированных покрытий и их термостойкость в зависимости от химического состава частично стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония проиллюстрированы табл. 2. Фазовый состав сформированных покрытий отличается от фазового состава исходных порошков, и отличие связано с однородностью распределения элементов в исходном порошковом материале. Перераспределение элементов происходит при нахождении материала в плазменном потоке. Варьируя химический состав порошков, можно изменять структуру и свойства сформированного теплозащитного покрытия (ТЗП). Проводили циклическое тестирование покрытий в электропечи. Цикл состоял из нагрева до установленной температуры  $1300$  °С и выдержки в течение 60 мин с последующим охлаждением до температуры  $300$  °С. После проведения 10 циклов образцы изымали для визуальной проверки. Испытания длились до видимой невооруженным глазом дефектации керамического слоя (формирование трещины или скола). По результатам исследований структуры и физико-механических свойств нанесенных многослойных покрытий проанализирован механизм формирования теплозащитных и износостойких слоев. При плазменном напылении  $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$  теплозащитные свойства формируются за счет тетрагональной фазы  $ZrO_2$ , микрорастрескивания покрытия в перпендикулярном подложке направлении (сег-

ментации). При напылении  $60\% (Al_2O_3 - TiO_2) - 40\% Ni-Cr-Al-Y-Ta$  износостойкость формируется структурными элементами, обеспечивающими повышенную маслоудерживающую способность покрытий (никель, хром). Необходимые свойства достигаются также за счет оксидных включений в связующем матричном материале, которые обуславливают повышенную твердость нанесенных слоев. Рассмотренный механизм формирования свойств многослойных покрытий при напылении композиционных материалов свидетельствует о том, что имеется возможность улучшения теплозащитных характеристик и износостойкости путем обработки нанесенных слоев воздействиями компрессионной плазмы. Однако подобное утверждение требует экспериментальной проверки, что предусмотрено осуществить на следующем этапе исследований.

Таблица 1

Содержание элементов  
в порошковых частицах  $ZrO_2-Y_2O_3$ ,  
полученных химико-термическим методом  
(анализировали на площади  $10 \times 12$  мкм)  
Content of elements in  $ZrO_2-Y_2O_3$  powder  
particles, obtained by chemical-thermal method  
(analyzed over an area of  $10 \times 12$  μm)

№	Содержание оксидов и элементов в порошковых частицах $ZrO_2-Y_2O_3$				
	O	Y	Zr	$ZrO_2$	$Y_2O_3$
По сечению порошковой частицы					
1	19,70	3,60	76,70	98,50	1,50
2	20,70	3,80	75,50	98,18	1,82
На поверхности порошковой частицы					
1	20,73	3,97	75,30	98,90	1,10
2	18,70	4,47	76,83	98,80	1,20

Таблица 2

Фазовый состав сформированных покрытий и их термостойкость  
в зависимости от химического состава частично стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония  
Phase composition of the formed coatings and their heat resistance depending  
on the chemical composition of zirconium dioxide partially stabilized with yttria

Состав материала	Метод изготовления порошка	Фаза, %			Количество проведенных термоциклов
		кубическая	моноклинная	тетрагональная	
$ZrO_2 - 6,0\% Y_2O_3$	Метод химико-термический	10,0	33,0	57,0	282
$ZrO_2 - 8,0\% Y_2O_3$	–	–	1,1	98,9	434
$ZrO_2 - 7,0\% Y_2O_3$	–	2,1	6,5	91,4	615

Покрyтия сформированы на одном режиме: ток дуги  $I = 600$  А, расход аргона  $R_{Ar} = 30$  л/мин, расход водорода  $R_{H_2} = 8$  л/мин, дистанция формирования  $L = 110$  мм, охлаждение сжатым воздухом, расход воздуха  $R_{п} = 2,5$  кг/ч.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы создания многослойных плазменных теплозащитных и износостойких покрытий. Обоснованы утверждения о том, что в качестве материала для формирования плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур, наиболее пригоден частично стабилизированный диоксид циркония, а для износостойких – композиционный материал на базе оксидной керамики и сплавов на основе никеля.

2. Исследованы свойства применяемых материалов. Можно констатировать, что многослойные, сформированные плазменным напылением покрытия с необходимыми для эксплуатации в условиях высокотемпературного износа характеристиками можно сформировать только из материалов со строго установленными размерами и морфологией частиц у исходных порошковых материалов. Обязательным условием также является гомогенность по сечению у исходных порошков фазового и химического составов при минимальном размере фазовых включений. На основе осуществленных экспериментов авторы получили следующие результаты:

1) частицы частично стабилизированного диоксида циркония содержат преобладающую тетрагональную фазу  $Y_{0,15}Zr_{0,85}O_{0,93}$ , моноклинную и кубическую фазы  $ZrO_2$ , а частицы композиционного износостойкого материала – элементы, способствующие его износостойкости (фазы  $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$  твердого раствора на основе никеля, фазы  $\alpha-Al_2O_3$ ,  $\gamma-Al_2O_3$ , орторомбическая фаза оксида титана  $TiO_2$ );

2) оптимизированные по коэффициенту использования порошка технологические параметры плазменного напыления многослойных теплозащитных и износостойких покрытий, где критериями оптимизации служили коэффициент использования напыляемого порошкового материала и структура покрытий, для многослойного теплозащитного покрытия на базе

частично стабилизированного диоксида циркония учитывали также его стойкость к термодинамическому циклированию, выбирая режимы с повышенной долговечностью нанесенного слоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой NiCr и твердый  $ZrO_2$ ) / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28>.
2. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравномерной структурой / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 183–189. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189>.
3. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 5. С. 377–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389>.
4. Формирование покрытий на основе диоксида циркония на элементах экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского технического университета. 2018. № 6 (130). С. 94–101. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-6-94-100>.
5. Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 6. С. 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474>.
6. Разработка композиционного материала на основе керамики с применением добавок соединений тугоплавких металлов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 4 (140). С. 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24>.
7. Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных покрытий / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2021. № 2. С. 15–27.
8. Обзор современного применения металлокерамических покрытий / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 5–17. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-3-5-17>.
9. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методами плазменного напыления на воздухе / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 5. С. 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374>.
10. Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll / F. I. Panteleenko [et al.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 93–98. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-93-98>.
11. Выбор оптимальных параметров нанесения многослойных плазменных покрытий из материалов на ос-

нове никелевых М-кролей / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 1. С. 12–22. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-1-12-22>.

Поступила 10.01.2023

Подписана к печати 14.03.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

## REFERENCES

- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2018) Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO<sub>2</sub> Layer). *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (1), 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28> (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. (2018) Technological Specific Features on Formation of Plasma Powder Coatings from Ceramics with Non-Equilibrium Structure. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (3), 183–189. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189> (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N. (2018) Formation and Investigation of Plasma Powder Coatings Made of Oxide Ceramics Modified with High-Energy Effects. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (5), 378–389. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-378-389> (in Russian).
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V. (2018) Formation of Coatings on the Basis of zirconium Dioxide on the Elements of Screens of Anti-Elementary Protection. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 130 (6), 94–100. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-6-94-100> (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2020) Formation of Plasma Powder Coatings from Cermet with Subsequent High-Energy Modification. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 19 (6), 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474> (in Russian).
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Rafal K. (2020) Development of Composite Material Based on Ceramics with the Use of Additives of Refractory Metal Compounds. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 140 (4), 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24> (in Russian).
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V. (2021) Formation and Research Multilayer Composite Plasma Coatings. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (2), 15–27 (in Russian).
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2021) Overview of Modern Ceramic Coating Applications. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 145 (3), 5–17. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2021-3-5-17> (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2021) Optimization of Coating Process from Cermet Powders by Plasma Spraying in Air. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 20 (5), 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374> (in Russian).
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Switala F. (2022) Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (2), 93–98. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-93-98>.
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Franciszek S., Blumenstein V. Yu. (2022) Selection of Optimal Parameters for Applying Multilayer Plasma Coatings From Materials Based on Nickel M-Croll. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 149 (1), 12–22. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-1-12-22> (in Russian).

Received: 10.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.05.2023