

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374>

УДК 621.793.71

## Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методом плазменного напыления на воздухе

Канд. техн. наук В. А. Оковитый<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко<sup>1)</sup>,  
инж. В. В. Оковитый<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский<sup>2)</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)

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Произведена оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики с различным содержанием твердой фазы методом плазменного напыления на воздухе для восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов, работающих в неблагоприятных условиях. Такие условия обычно создаются в тяжело нагруженных трибосопряжениях во время работы механизмов с небольшой скоростью относительного перемещения поверхностей при трении. Эксплуатируемые рабочие поверхности разрушаются в основном из-за микроконтактного схватывания и последующего отрыва сформированных частиц в точках их контакта. Нанесение специальных защитных покрытий с требуемыми свойствами возможно при изготовлении качественных исходных порошковых материалов и оптимизации технологии их нанесения. Получить такие порошки и порошковые композиции можно методом агломерирования мелкодисперсной порошковой шихты с ее последующим высокотемпературным спеканием. Для выявления механизма упрочнения сформированных газотермическим напылением композиционных покрытий из металлокерамики важные этапы – это оптимизация параметров процесса напыления и изучение свойств получаемых плазменных покрытий. При оптимизации технологических параметров плазменного напыления покрытий учитывали коэффициент использования порошкового материала как основного показателя эффективности процесса, структуру полученных слоев, морфологию отдельных нанесенных на полированную поверхность частиц. В статье приведены данные об элементах структуры напыленных материалов для износостойких покрытий, полученных плазменным напылением на оптимальных режимах. С учетом процессов, происходящих при изнашивании трибосопряжений, эти данные свидетельствуют об имеющихся предпосылках износостойкости исследуемых композиционных покрытий из металлокерамики. Специальные износостойкие покрытия из материалов с мягкой матрицей, упрочненных твердыми включениями  $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y$ , находят широкое применение в различных отраслях промышленности. На основе подробного анализа особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что такие порошковые композиции (комплексные оксиды – металлическая составляющая) часто используются в качестве износостойких плазменных покрытий. Результаты исследований могут быть учтены в случаях нанесения износостойких плазменных покрытий из металлокерамики и композиций на их базе, содержащих твердые фазы в виде оксидов, а также изготовления целого спектра деталей, работающих в условиях интенсивного износа.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, порошковые материалы, газотермически напыленные композиционные покрытия, твердые включения, металлокерамика, изнашивание трибосопряжений, элементы структуры, морфология, износостойкость

**Для цитирования:** Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методом 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>

### 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  
niil\_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  
niil\_svarka@bntu.by

## Optimization of Coating Process from Cermet Powders by Plasma Spraying in Air

V. A. Okovity<sup>1</sup>, F. I. Panteleenko<sup>1</sup>, V. V. Okovity<sup>1</sup>, V. M. Astashinsky<sup>2</sup>

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

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

**Abstract.** The paper presents studies on the optimization of the process of applying coatings from cermet powders with different solid phase contents by plasma spraying in air to restore and harden parts of machines and mechanisms operating under adverse conditions. Such conditions are usually created in heavily loaded tribojoints when the mechanisms operate at a low speed of relative movement of surfaces during friction. At the same time, the destruction of the working surfaces is mainly due to the process of microcontact setting and subsequent detachment of the formed particles at their contact points. The application of special protective coatings with the required properties is possible with the manufacture of high-quality starting powder materials and optimization of the technology for their application. Such powders and powder compositions can be obtained by the method of agglomeration of a fine powder mixture with its subsequent high-temperature sintering. To identify the hardening mechanism of composite coatings made of cermet by gas-thermal spraying, important stages are the optimization of the deposition process parameters and the study of the properties of plasma coatings obtained in this case. When optimizing the technological parameters of plasma spraying of coatings, the utilization rate of the sprayed powder material has been taken into account as the main indicator of the process efficiency, the structure of the obtained layers, and the morphology of individual particles deposited on the polished surface. The paper provides data on the structural elements of sprayed materials for wear-resistant coatings obtained by plasma spraying at optimal conditions. Taking into account the processes that occur during the wear of tribological conjugations, the data indicate the existing prerequisites for the wear resistance of the studied composite coatings made of metal ceramics. Special wear-resistant coatings made of materials with a soft matrix hardened by solid inclusions  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y}$  are widely used in various industries. Based on the detailed analysis of the features of cermet plasma coatings, it can be stated that such powder compositions (complex oxides-metal component) are often used as wear-resistant plasma coatings. The research results can be taken into account in cases of application of wear-resistant plasma coatings made of metal-ceramics and compositions based on them, containing solid phases in the form of oxides, as well as the manufacture of a whole range of parts operating under conditions of intense wear.

**Keywords:** plasma spraying, powder materials, gas-thermally sprayed composite coatings, solid inclusions, metal ceramics, tribological conjugation wear processes, structural elements, morphology, wear resistance

**For citation:** 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. *Science and Technique*. 20 (5), 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374> (in Russian)

### Введение

Для современных деталей один из главных критериев – низкая материалоемкость. Применение износостойких газотермических покрытий на деталях позволяет значительно снизить металлоемкость изделия, заменить стальные конструкции на более легкие материалы при сохранении и даже увеличении ресурса работы. Чтобы достичь поставленной цели, авторы проанализировали условия формирования структур плазменных покрытий, исследовали влияние основных технологических параметров (расхода плазмообразующего газа, температурного режима напыления) на формирование структур

плазменных покрытий из композиционных металлокерамических порошков, обобщили результаты исследований по плазменному напылению композиционных покрытий.

Износостойкие покрытия из материалов с мягкой матрицей, упрочненных твердыми включениями  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y}$ , широко используются в промышленности [1–8]. На основе подробного анализа особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что данные композиции (оксид-металлическая составляющая) часто применяются в качестве износостойких плазменных покрытий [9–11]. Предлагаемое авторами направление исследований касается технологии

плазменного нанесения износостойких покрытий для восстановления и упрочнения деталей, работающих в неблагоприятных условиях или в отсутствие достаточного количества смазочного материала, при значительных нагрузках и широком спектре изменения температур (моторостроение, металлургия, авиация, космические технологии). Согласно результатам экспериментов, для таких эксплуатационных условий эффективны упрочненные методом газотермического напыления покрытия, содержащие твердые тугоплавкие металлокерамические соединения [12–14].

### Методика исследований

Получаемые покрытия наносили плазменным напылением на воздухе (APS) [1–4]. В качестве материала основы для проведения исследований брали сталь Ст45, которую часто применяют при изготовлении деталей. Процессы напыления осуществляли в атмосфере воздуха на установке УПУ-3Д с использованием специально разработанного авторами плазмотрона и питателя для подачи металлокерамических порошков TWIN-10. Структуру покрытий исследовали с помощью методов оптической металлографии (оптические микроскопы Polyvar (Австрия) и Neophot-20 (Германия)), а также изучали эксплуатационные характеристики покрытий. Пористость и твердость измеряли на оптическом микроскопе Mef-3 фир-

мы Reichert (Австрия). Порошки  $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$  (рис. 1) изготавливались методом агломерирования из мелкодисперсной порошковой шихты с последующим высокотемпературным спеканием.

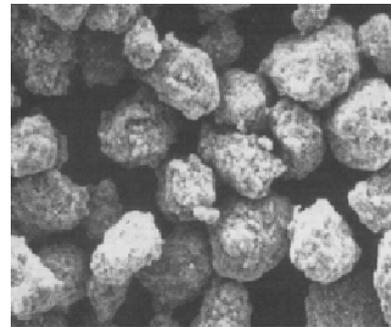


Рис. 1. Морфология частиц порошковой металлокерамической композиции 60 %  $Al_2O_3-TiO_2$  – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta после гранулирования (×200)

Fig. 1. Particle morphology of 60 %  $Al_2O_3-TiO_2$  – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta metal-ceramic powder after granulation (×200)

Вначале проводили оптимизацию параметров напыления на воздухе с учетом процесса растекания на основании теста (splat-test). Затем выполняли процедуру оптимизации технологических режимов напыления с целью получения максимального коэффициента использования порошковых материалов (КИМ) как критерия эффективности процесса. Технологические характеристики режимов напыления и их показателей приведены в табл. 1 и на рис. 2–5.

Таблица 1

Режимы напыления плазменных металлокерамических покрытий из порошковой композиции 60 %  $Al_2O_3-TiO_2$  – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta  
Spraying modes of plasma metal-ceramic coatings from powder composition of 60 %  $Al_2O_3-TiO_2$  – 40 % Ni–Cr–Al–Y–Ta

| Параметр процесса                           | Режим напыления при расходе плазмообразующего газа $N_2$ |     |     |     |          |     |     |     |          |     |     |     |
|---|--|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|
|   | 45 л/мин   |     |     |     | 50 л/мин |     |     |     | 55 л/мин |     |     |     |
| Ток $I$ , А                                 | 300  | 400 | 500 | 600 | 300      | 400 | 500 | 600 | 300      | 400 | 500 | 600 |
| Расход транспортирующего газа $A_g$ , л/мин | 2,5  |     |     |     | 2,5      |     |     |     | 2,5      |     |     |     |
| Дистанция напыления $L$ , мм                | 120  |     |     |     | 110      |     |     |     | 100      |     |     |     |
| Подача порошка $R_{пор}$ , кг/ч             | 4,5  |     |     |     | 4,5      |     |     |     | 4,5      |     |     |     |

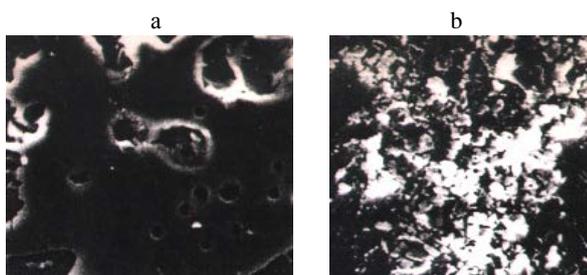


Рис. 2. Исследование процесса растекания композиций на основе металлокерамических порошков 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (a) и 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (b), нанесенных методом плазменного напыления на воздухе

Fig. 2. Investigation of spreading process of compositions based on metal-ceramic powders 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (a) and 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (b) sprayed by plasma spraying in air

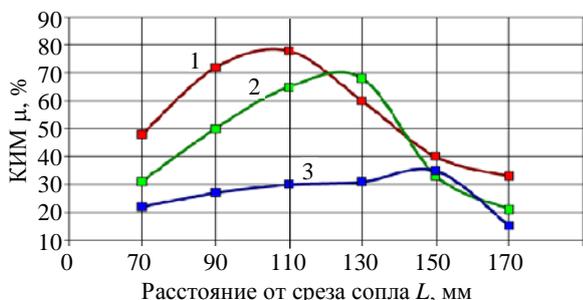


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошковых материалов от дистанции напыления для композиционных металлокерамических порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  с фракцией: 1 – 40–63 мкм; 2 – 63–100; 3 – 100–160 мкм ( $I = 500 \text{ A}$ ;  $R_{\text{N}_2} = 45 \text{ л/мин}$ ;  $R_{\text{пор}} = 4,5 \text{ кг/ч}$ )

Fig. 3. Dependence of utilization factor of powder materials versus spraying distance for composite metal-ceramic powders  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  with a fraction of: 1 – 40–63  $\mu\text{m}$ ; 2 – 63–100; 3 – 100–160  $\mu\text{m}$  ( $I = 500 \text{ A}$ ;  $R_{\text{N}_2} = 45 \text{ l/min}$ ;  $R_{\text{pow}} = 4.5 \text{ kg/h}$ )

Морфология участка поверхности сформированного покрытия из композиционного металлокерамического порошка 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  представлена на рис. 6. Анализ морфологии поверхности покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ , проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, показал наличие в нем довольно развитого рельефа сформированной поверхности с частичным ее оплавлением (рис. 6). Структура же самого плазменного покрытия представляет собой совокупность крупных (7–15 мкм) частиц оксидов и мелких (1–5 мкм) частиц М-кролей, спеченных между собой.

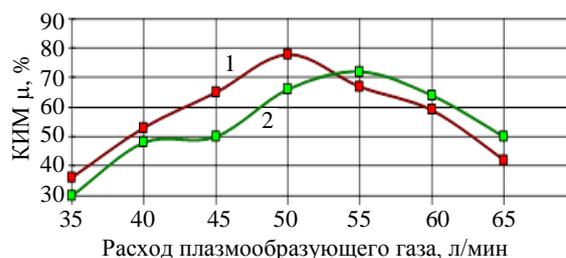


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошковых материалов от расхода плазмообразующего газа  $\text{N}_2$  для композиционных металлокерамических порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  с фракцией: 1 – 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм ( $L = 110 \text{ мм}$ ;  $I = 500 \text{ A}$ ;  $R_{\text{пор}} = 4,5 \text{ кг/ч}$ )

Fig. 4. Dependence of utilization factor of powder materials on consumption of plasma-forming gas  $\text{N}_2$  for composite ceramic-metal powders  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  with a fraction of: 1 – 40–63  $\mu\text{m}$ ; 2 – 63–100  $\mu\text{m}$  ( $L = 110 \text{ mm}$ ;  $I = 500 \text{ A}$ ;  $R_{\text{pow}} = 4.5 \text{ kg/h}$ )

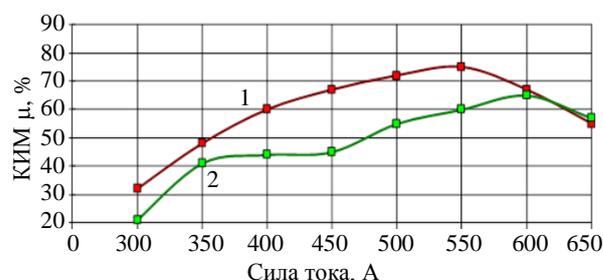


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошковых материалов от силы подводимого тока электрической дуги для композиционных металлокерамических порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  ( $L = 110 \text{ мм}$ ;  $R_{\text{N}_2} = 50 \text{ л/мин}$ ,  $R_{\text{пор}} = 4,5 \text{ кг/ч}$ , фракция 40–63 мкм)

Fig. 5. Dependence of utilization factor of powder materials on strength of the supplied electric arc current for composite ceramic-metal powders  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  ( $L = 110 \text{ mm}$ ;  $R_{\text{N}_2} = 50 \text{ l/min}$ ,  $R_{\text{pow}} = 4.5 \text{ kg/h}$ , fraction 40–63  $\mu\text{m}$ )

Структуры напыленных плазмой покрытий из металлокерамических порошков 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (рис. 7a) и 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (рис. 7b), сформированные с использованием комплекта оборудования для плазменного напыления на воздухе, показаны на рис. 7.

В износостойких плазменных покрытиях из металлокерамических композиционных порошков, полученных методом агломерирования из мелкодисперсной порошковой шихты с последующим высокотемпературным спеканием, четко видны как межчастичные, так и межслойные границы.

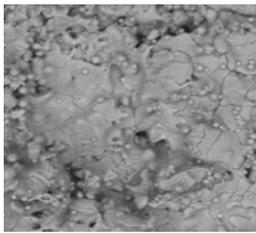


Рис. 6. Морфология участка поверхности сформированного покрытия из композиционного металлокерамического порошка 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  ( $\times 1000$ )

Fig. 6. Morphology of surface area of coating formed from composite metal-ceramic powder 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  ( $\times 1000$ )

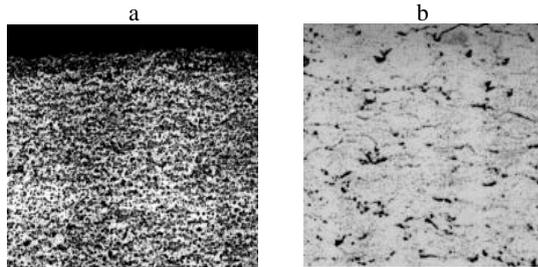


Рис. 7. Структуры напыленных плазмой на воздухе износостойких покрытий ( $\times 400$ ) из композиций на основе металлокерамических порошков 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (a) и 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (b)

Fig. 7. Plasma-sprayed structures in air wear-resistant coatings ( $\times 400$ ) from compositions based on metal-ceramic powders 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (a) and 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  (b)

Покрытия из порошков 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  характеризуются наличием общей пористости от 14 до 17 %, а из порошков 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  – пористостью от 9 до 12 %, а также равномерным распределением в них фазовых составляющих. Кроме того, наблюдается стабильное распределение твердой оксидной фазы в объемах, полученных напылением износостойких порошковых материалов. Практически отсутствуют поверхностные зоны с недостатком таких включений, что положительно влияет на работоспособность износостойких покрытий. При плазменном напылении порошковых композиций 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  формируемые покрытия имеют большую микротвердость по сравнению с порошковыми композициями 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ , что предопределено снижением общей пористости и соответственно увеличением однородности износостойких покрытий. Структура металлокерамических покрытий из порошковой композиции  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  ламинарная со значительно выраженной гетерогенностью. Об этом свидетельствует постепенное изменение окраски фона оксидных ламелей по сечению от светлого до темного.

## ВЫВОДЫ

1. Осуществлена оптимизация плазменно-го напыления на воздухе композиционного порошка 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  при изменении различных технологических параметров.

2. В процессе исследований изучено влияние на коэффициент использования порошкового материала:

– величины тока дуги при разных значениях расхода плазмообразующего газа;

– дистанции напыления;

– величины тока дуги при постоянном расходе плазмообразующего газа и разных значениях дистанции напыления.

3. Анализ морфологии оптимизированных по критерию эффективности плазменных износостойких покрытий из композиционных порошков на базе металлокерамики  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Ni-Cr-Al-Y-Ta}$ , проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, показал наличие в них развитого рельефа получаемой после напыления поверхности с частичным ее оплавлением. Структура же самого плазменного покрытия представляет собой совокупность крупных (7–15 мкм) частиц оксидов и мелких (1–5 мкм) частиц М-кролей, спеченных между собой.

4. В износостойких плазменных покрытиях из композиционных металлокерамических порошков, полученных методом агломерирования из мелкодисперсной порошковой шихты с последующим процессом их высокотемпературного спекания, четко видны как межчастичные, так и межслойные границы. Покрытия из композиционных порошков 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 30 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  характеризуются наличием общей пористости от 14 до 17 %, а из порошков 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  – 40 %  $\text{Ni-Cr-Al-Y-Ta}$  – пористостью от 9 до 12 %, а также равномерным распределением в них фазовых составляющих. Кроме того, наблюдается стабильное распределение твердой оксидной фазы в объемах, полученных напылением износостойких порошковых материалов. Практически отсутствуют поверхностные зоны с недостатком таких включений, что положительно влияет на работоспособность исследованных износостойких покрытий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Results of Investigation APS Process of Formation Plasma Spraying / V. A. Okovity [et al.] // Powder Technology 95, V-the Baltic Conference, Nov. 7–8, 2005. Tallinn, 2005. P. 58–60.
2. Properties of Plasma Spraying Coatings / V. A. Okovity [et al.] // Nove Smery vo Vyrobných Technológiach 2000: Proc. of 6 Conference. Presov (Slovenska Republic), 2001. P. 221–225.

3. Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 181–188. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188>.
4. Пантелеенко, Ф. И. Исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий диоксид циркония – нихром / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, Е. Ф. Пантелеенко // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4, № 3. С. 100–105.
5. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO<sub>2</sub> слой) / 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>.
6. Способ получения композиционного керамического материала: пат. № 13690 РБ; МПК C04B 35/10 / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый. Опубл. 30.10.2010.
7. Parameter Studies on High-Velocity Oxy-Fuel Spraying of CoNiCrAlY Coatings Used in the Aeronautical Industry / J. A. Cabral-Miramontes [et al.] // Int. J. Corros. 2014. P. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/703806>.
8. Identification of the High-Temperature Impact/Friction of Aeroengine Blades and Cases by Micro Raman Spectroscopy / P. Colomban [et al.] // Aerosp. Sci. Technol. 1999. Vol. 3, No 7. P. 447–459. [https://doi.org/10.1016/s1270-9638\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/s1270-9638(99)00102-9).
9. Development of Oxide Dispersion Strengthened MCrAlY Coatings / K. Bobzin [et al.] // J. Therm. Spray Technol. 2008. Vol. 17, No 5–6. P. 853–857. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9244-7>.
10. Crawmer, D. E. Coating Structures, Properties, and Materials / D. E. Crawmer, ed. J. R. Davis // Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International. USA: Materials Park, OH, 2004. P. 47–53.
11. Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C Composite Coatings / Y. Cao [et al.] // J. Therm. Spray Technol. 2014. Vol. 23, No 4. P. 716–724. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0061-x>.
12. Influence of the Microstructure of Plasma Deposited MCrAlY their Tribological Behaviour / S. Li [et al.] // Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 100–101. P. 7–11. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00579-3](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00579-3).
13. Zhao, L. Wear Behaviour of AbO<sub>3</sub> Dispersion Strengthened MCrAlY Coating / L. Zhao, M. Parco, E. Lugscheider // Surf. Coat. Technol. 2004. Vol. 184, No 2–3. P. 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.055>.
14. Zhao, L. High Temperature Frictional Wear Behaviors of Nano-Particle Reinforced NiCoCrAlY Cladded Coatings / L. Zhao, M. Parco, E. Lugscheider // Trans. Nonferr. Met. Soc. China. 2011. Vol. 21, No 6. P. 1322–1328. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60860-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60860-1).
5. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2017) Production of Composite Ceramic Material for Thermal Spraying. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 181–188. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188> (in Russian).
4. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko E. F. (2017) Study of Plasma Two-Layer Composite Zirconium Dioxide – Nichrome Coatings. *Aktualnye Problemy v Mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 4 (3), 100–105 (in Russian).
5. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chemik 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).
6. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoyno O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2009) *Method for Obtaining Composite Ceramic Material*. Patent No 13690 Republic of Belarus (in Russian).
7. Cabral-Miramontes J. A., Gaona-Tiburcio C., Almeraya-Calderón F., Estupiñan-Lopez F. H., Pedraza-Basulto G. K., Poblano-Salas C. A. (2014) Parameter Studies on High-Velocity Oxy-Fuel Spraying of CoNiCrAlY Coatings Used in the Aeronautical Industry. *International Journal of Corrosion*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/703806>.
8. Colomban P., Jullian S., Parlier M., Monge-Cadet P. (1999) Identification of the High-Temperature Impact/Friction of Aeroengine Blades and Cases by Micro Raman Spectroscopy. *Aerospace Science and Technology*, 3 (7), 447–459. [https://doi.org/10.1016/s1270-9638\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/s1270-9638(99)00102-9).
9. Bobzin K., Schäfer T., Richardt K., Brühl M. (2008) Development of Oxide Dispersion Strengthened MCrAlY Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17 (5–6), 853–857. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9244-7>.
10. Crawmer D. E., Davis J. R. (2004) Coating Structures, Properties, and Materials. *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International. USA: Materials Park, OH, 47–53.
11. Cao Y., Huang C., Liu W., Zhang W., Du L. (2014) Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C Composite Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23 (4), 716–724. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0061-x>.
12. Li S., Langlade C., Fayeulle S., Tréheux D. (1998) Influence of the Microstructure of Plasma Deposited MCrAlY their Tribological Behaviour. *Surface and Coatings Technology*, 100–101, 7–11. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00579-3](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00579-3).
13. Zhao L., Parco M., Lugscheider E. (2004) Wear Behaviour of AbO<sub>3</sub> Dispersion Strengthened MCrAlY Coating. *Surface and Coatings Technology*, 184 (2–3), 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.055>.
14. Zhao L., Parco M., Lugscheider E. (2011) High Temperature Frictional Wear Behaviors of Nano-Particle Reinforced NiCoCrAlY Cladded Coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21 (6), 1322–1328. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60860-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60860-1).

Поступила 14.10.2019

Подписана в печать 28.01.2020

Опубликована онлайн 30.09.2021

#### REFERENCES

Received: 14.10.2019

Accepted: 28.01.2020

Published online: 30.09.2021