

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189>

УДК 621.793.71

Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾,
инж. В. В. Оковитый¹⁾

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье представлены исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка на характеристики плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой. Проведена оптимизация параметров APS (плазменное напыление на воздухе) процесса для материалов NiAl, Al₂O₃-Cr₂O-TiO₂ – 15 % (CaF₂-Ni) и FeCr30Mo3 – 12 % CaF₂ – 50 % TiC. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала. Структура покрытий, их химический и фазовый составы оказывают определяющее влияние на физико-механические свойства покрытий, в частности на пористость, прочность сцепления и износостойкость. Формируемые на подложке в процессе напыления структура и состав покрытия зависят от энергетических характеристик процесса плазменного напыления, эффективности теплообменных процессов между дисперсной и газовой фазами высокотемпературной плазменной струи, а также от состава, структуры и свойств применяемых материалов. Таким образом, наблюдается стабильное распределение твердой оксидной фазы в объемах напыленных материалов и отсутствуют поверхностные зоны с дефицитом подобных включений, что положительно влияет на работоспособность исследуемых износостойких покрытий. При плазменном напылении порошков Al₂O₃-Cr₂O-TiO₂ – 15 % (CaF₂-Ni) формируется покрытие с более высокой микротвердостью, по сравнению с порошками Al₂O₃-Cr₂O-TiO₂ – 15 % (MoS₂-Ni), что обусловлено снижением пористости и повышением однородности покрытий. На плотность покрытий, характер распределения фаз, а также на прочностные характеристики (износостойкость и прочность сцепления) большое влияние оказывает зернистость покрытий.

Ключевые слова: плазменные порошковые покрытия, неравновесная структура, оптимизация процесса, коэффициент использования порошка, химический и фазовый составы

Для цитирования: Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной 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>

Technological Specific Features on Formation of Plasma Powder Coatings from Ceramics with Non-Equilibrium Structure

V. A. Okovity¹⁾, F. I. Panteleenko¹⁾, V. M. Astashinsky²⁾, V. V. Okovity¹⁾

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

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

Abstract. The paper presents investigations on studying the influence of plasma jet parameters (current, sputtering distance, consumption of nitrogen plasma forming gas), fractional composition of an initial powder on characteristics of plasma powder

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

coatings from ceramics with a non-equilibrium structure. Optimization of APS parameters (plasma spraying in air) has been carried out for the following materials: NiAl, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$) and $\text{FeCr30Mo3} - 12\%$ $\text{CaF}_2 - 50\%$ TiC. The optimization of sputtering parameters has been made on the basis of obtaining maximum coefficient of the material use. Structure of coatings, their chemical and phase compositions have a determining effect on physical and mechanical properties of the coatings, in particular, on porosity, adhesion strength and wear resistance. In its turn, a structure and a composition of the coating formed on the substrate depend on energy characteristics of the plasma sputtering process, an efficiency of heat exchange processes between dispersed and gas phases of high-temperature plasma jet, and also on a composition, a structure, and properties of the used materials. Thus, a stable distribution of a solid oxide phase has been observed in the volumes of sputtered materials and there are no surface zones with a deficiency of such inclusions that positively affects operability of the investigated wear-resistant coatings. While carrying out plasma deposition of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$) powders, a coating with a higher micro-hardness has been formed in comparison with $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{MoS}_2\text{-Ni}$) powders that is due to a decrease in porosity and an increase in uniformity of coatings. Graininess of the coatings exerts a significant influence on density of coatings, nature of phase distribution and strength characteristics (wear resistance and adhesion strength).

Keywords: plasma powder coatings, non-equilibrium structure, process optimization, powder utilization ratio, chemical and phase composition

For citation: 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. *Science and Technique*. 17 (3), 183–189. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-183-189> (in Russian)

Введение

Основной характеристикой плазменных покрытий в большинстве случаев является прочность их сцепления с основой. Даже для покрытий, которые вообще не несут силовой нагрузки при эксплуатации изделия, а выполняют функции защиты поверхности от окисления и эрозии, их работоспособность с учетом случайного характера переменных нагрузок зависит от прочности сцепления [1–5].

В общем случае покрытие представляет собой многослойную систему, включающую металлический подслои и внешний керамический слой. Основная причина разрушения плазменных покрытий – термомеханические напряжения, возникающие вследствие рассогласования термического расширения металла основы и керамического слоя, а также неравномерности распределения температурного поля в покрытии. Термомеханические напряжения усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое [6–10].

Получение неравновесных состояний структур возможно при плазменном напылении покрытий с определенными технологическими параметрами, обеспечивающими сверхбыстрое охлаждение расплава частиц напыляемого материала. Необходимо отметить, что возможности и процессы получения таких структур при плазменном напылении покрытий изучены недостаточно. Это относится прежде всего к по-

крытиям из композиционных порошков на основе керамики. Учитывая актуальность проблемы, цель работы – исследование и разработка процесса формирования плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики с неравновесной структурой. Для решения этой задачи были предусмотрены оптимизация процесса формирования плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики с неравновесной структурой на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (твердой смазки) и исследование свойств напыленных при оптимальных режимах плазменных порошковых покрытий из оксидной и карбидной керамики с неравновесной структурой.

Оптимизация процесса формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой

В процессе плазменного напыления действует большое число факторов, оказывающих влияние на свойства получаемых покрытий. Важнейшими из них, при прочих равных условиях, являются: расход плазмообразующего и транспортирующего газов, расход распыляемого порошка, ток электрической дуги (подводимая мощность), дистанция напыления, скорость перемещения подложки [11–14]. В качестве примера на рис. 1–8 представлены зависимости эффективности плазменного напыления при атмосферном давлении, характеризовать которые можно с помощью коэффициента использования распыляемого материала (порошка) КИП от перечисленных условий напыления. Проведена оптимизация параметров APS (плаз-

менное напыление на воздухе) процесса для материала подслоя NiAl, материалов керамики с неравновесной структурой $\text{FeCr30Mo3} + 12\% \text{CaF}_2 - 50\% \text{TiC}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2 - \text{Ni})$. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала. На первом этапе для постоянных значений I и N_2 изменялась дистанция напыления. На втором – при постоянных значениях дистанции напыления и тока изменялись величины плазмообразующего газа N_2 . На третьем этапе при постоянных значениях дистанции напыления и расхода азота изменялась величина тока.

На оптимальных режимах для NiAl (расход плазмообразующего газа азота 48 л/мин, ток 350 А, дистанция напыления 100 мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка 4,5 кг/ч) получены покрытия с КИП 78 %. На оптимальных режимах для $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2 - \text{Ni})$ (расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин, ток 550 А, дистанция напыления 110 мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка 4,0 кг/ч, относительная скорость перемещения подложки $v_n = 300$ мм/с) получены покрытия с КИП 65 %, а для $\text{FeCr30Mo3} + 12\% \text{CaF}_2 - 50\% \text{TiC}$ (расход плазмообразующего газа азота 55 л/мин, ток 550 А, дистанция напыления 130 мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка 4,5 кг/ч, относительная скорость перемещения подложки $v_n = 250$ мм/с) получены покрытия с КИП 60 %.

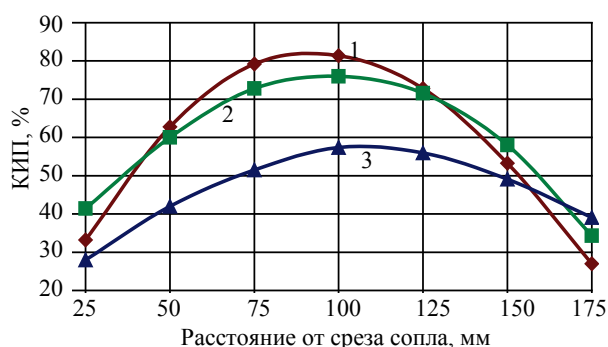


Рис. 1. Зависимость КИП от дистанции напыления L для порошков NiAl с фракцией: 1 – 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; 3 – 100–160 мкм ($I = 300$ А; $R_N = 45$ л/мин; $R_{\text{pore}} = 4,5$ кг/ч)

Fig. 1. Dependence of material use coefficient on sputtering distance L for NiAl powders with fraction of: 1 – 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; 3 – 100–160 μm ($I = 300$ А; $R_N = 45$ l/min; $R_{\text{pore}} = 4.5$ kg/h)

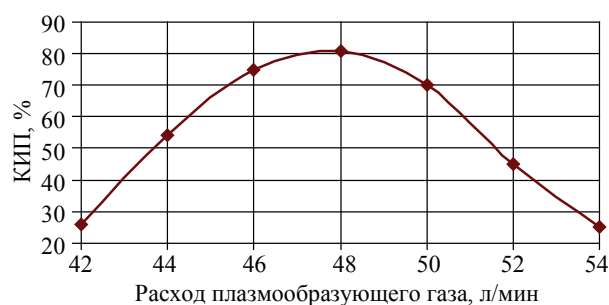


Рис. 2. Зависимость КИП от расхода плазмообразующего газа N_2 для порошков NiAl ($L = 100$ мм; $I = 500$ А; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч; фракция 40–63 мкм)

Fig. 2. Dependence of material use coefficient on consumption of plasma-forming gas N_2 for NiAl powders ($L = 100$ мм; $I = 500$ А; $R_{\text{pore}} = 4.5$ kg/h; fraction 40–63 μm)

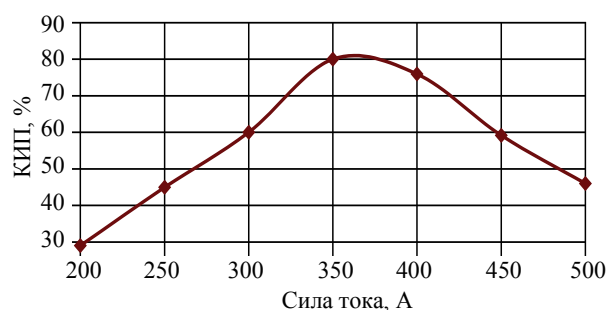


Рис. 3. Зависимость КИП от силы тока электрической дуги I для порошков NiAl ($L = 100$ мм; $R_N = 48$ л/мин; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч; фракция 40–63 мкм)

Fig. 3. Dependence of material use coefficient on current strength of electric arc I for NiAl powders ($L = 100$ мм; $R_N = 48$ l/min; $R_{\text{pore}} = 4.5$ kg/h; fraction 40–63 μm)

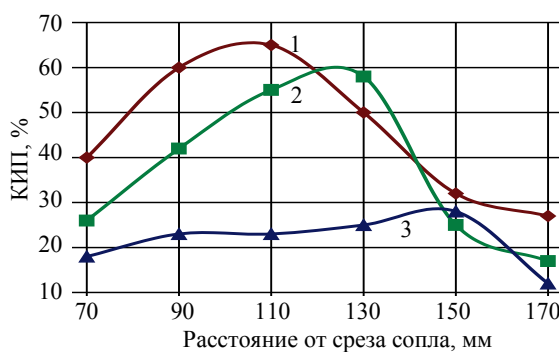


Рис. 4. Зависимость КИП от дистанции напыления L для порошков: $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2 - \text{Ni})$ (1 – с фракцией 40–63 мкм; 3 – с фракцией 100–160 мкм) и $\text{FeCr30Mo3} + 12\% \text{CaF}_2 - 50\% \text{TiC}$ (2 – с фракцией 40–63 мкм) ($I = 500$ А; $R_N = 45$ л/мин; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч)

Fig. 4. Dependence of material use coefficient on sputtering distance L for powders: $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2 - \text{Ni})$ (1 – with fraction of 40–63 μm ; 3 – with fraction of 100–160 μm) and $\text{FeCr30Mo3} + 12\% \text{CaF}_2 - 50\% \text{TiC}$ (2 – with fraction 40–63 μm) ($I = 500$ А; $R_N = 45$ l/min; $R_{\text{pore}} = 4.5$ kg/h)

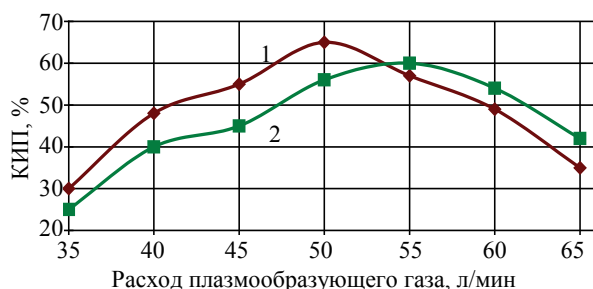


Рис. 5. Зависимость КИП от расхода плазмообразующего газа N_2 для порошков: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) (1) и $FeCr_3Mo_3 + 12\% CaF_2 - 50\% TiC$ (2) ($L = 110$ мм; $I = 500$ А; $R_{пор} = 4,5$ кг/ч; фракция 40–63 мкм)

Fig. 5. Dependence material use coefficient on consumption of plasma-forming gas N_2 for powders: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) (1) and $FeCr_3Mo_3 + 12\% CaF_2 - 50\% TiC$ (2) ($L = 110$ mm; $I = 500$ A; $R_{pore} = 4.5$ kg/h; fraction 40–63 μ m)

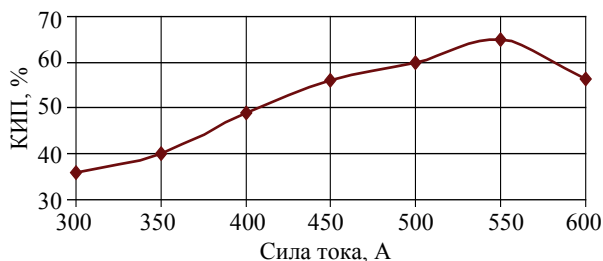


Рис. 6. Зависимость КИП от силы тока электрической дуги I для порошков $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) ($L = 110$ мм; $R_N = 50$ л/мин; $R_{пор} = 4,5$ кг/ч; фракция 40–63 мкм)

Fig. 6. Dependence of material use coefficient on current strength of electric arc I for powders: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) ($L = 110$ mm; $R_N = 50$ l/min; $R_{pore} = 4.5$ kg/h; fraction 40–63 μ m)

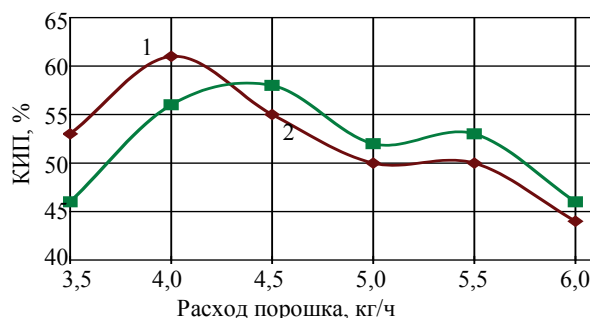


Рис. 7. Зависимость КИП от расхода порошка R_n для порошков: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) (1) и $FeCr_3Mo_3 + 12\% CaF_2 - 50\% TiC$ (2) ($L = 110$ мм; $I = 500$ А; фракция 40–63 мкм)

Fig. 7. Dependence of material use coefficient on powder consumption R_n for powders: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) (1) and $FeCr_3Mo_3 + 12\% CaF_2 - 50\% TiC$ (2) ($L = 110$ mm; $I = 500$ A; fraction of 40–63 μ m)

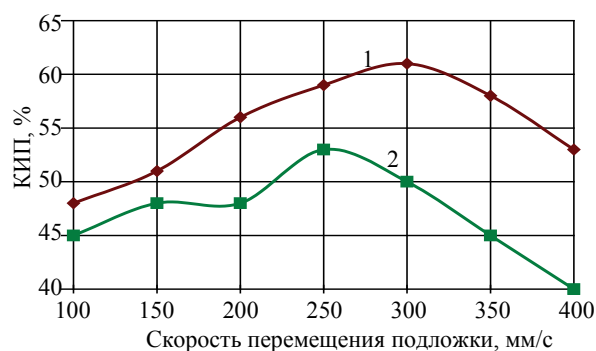


Рис. 8. Зависимость КИП от относительной скорости перемещения подложки v_n для порошков: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) (1) и $FeCr_3Mo_3 + 12\% CaF_2 - 50\% TiC$ (2) ($L = 110$ мм; $I = 500$ А; фракция 40–63 мкм)

Fig. 8. Dependence of material use coefficient on relative velocity of substrate displacement v_n for powders: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2 - 15\%$ (CaF_2-Ni) (1) and $FeCr_3Mo_3 + 12\% CaF_2 - 50\% TiC$ (2) ($L = 110$ mm; $I = 500$ A; fraction 40–63 μ m)

Исследование свойств напыленных при оптимальных режимах плазменных порошковых покрытий из оксидной и карбидной керамики с неравновесной структурой

Структура покрытий, их химический и фазовый составы оказывают определяющее влияние на физико-механические свойства покрытий, в частности на пористость, прочность сцепления и износостойкость. В свою очередь, формируемые на подложке в процессе напыления структура и состав покрытия зависят от энергетических характеристик процесса плазменного напыления, эффективности теплообменных процессов между дисперсной и газовой фазами высокотемпературной плазменной струи, а также от состава, структуры и свойств применяемых материалов. Нанесение покрытия производили на следующих режимах работы оборудования: напыление подслоя покрытия (порошок ПН85Ю15) (расход плазмообразующего газа азота 48 л/мин, ток 350 А, дистанция напыления 100 мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка 4,5 кг/ч); напыление износостойкого слоя из порошков оксидной керамики с неравновесной структурой толщиной 0,30–0,35 мм проводилось на оптимизированных режимах: $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2$ – твердая смазка (расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин, ток 550 А, дистанция напыле-

ния 110 мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка 4,0 кг/ч, относительная скорость перемещения подложки $v_{\text{п}} = 300$ мм/с). Фазовый состав покрытий определялся методом рентгеноструктурного анализа на рентгенографическом дифрактометре ДРОН-3. Количественное содержание фаз и равномерность их распределения определяли на сканирующем электронном микроскопе Nanolab-7 при увеличении от 1000 до 10000 раз. Количественные оценки параметров находили как усредненные по пяти измерениям. Прочность сцепления определяли на отрывной машине Instron.

Микроструктуры плазменных покрытий из порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$) и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{MoS}_2\text{-Ni}$), полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием, приведены на рис. 9.

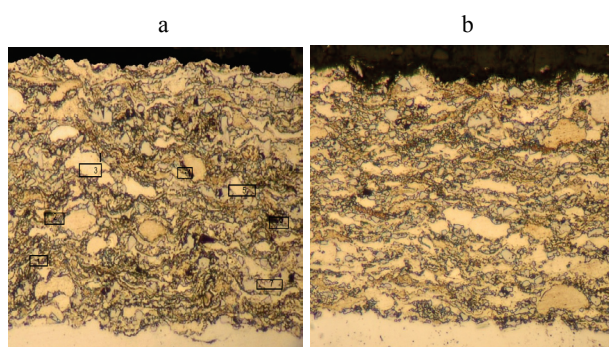


Рис. 9. Микроструктура плазменного покрытия из порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – твердая смазка, полученных методом агломерирования мелкодисперсной шихты с последующим высокотемпературным спеканием ($\times 500$): а – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$); б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{MoS}_2\text{-Ni}$)

Fig. 9. Microstructure of plasma coating of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ powders – solid lubricant obtained while using method of agglomerating fine batch with subsequent high-temperature sintering ($\times 500$): а – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$); б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{MoS}_2\text{-Ni}$)

В плазменных покрытиях из порошков, полученных названным методом, четко проявля-

ются межчастичные и межслойные границы. Покрытия характеризуются наличием пористости до 10 % и равномерным распределением фазовых составляющих.

Значения микротвердости являются интегральной характеристикой материала покрытий, поскольку измерить микротвердость отдельных структурных составляющих в ряде случаев не представляется возможным из-за их малых размеров. Измерения проводили при нагрузках на индентор 0,490 Н, поскольку при более высоких нагрузках появляются трещины. Результаты замеров представлены в табл. 1. Анализируя данные табл. 1, необходимо отметить, что имеют место достаточно стабильные пределы изменения микротвердости в поясах замеров по длине поперечных сечений напыленных материалов. При этом верхним пределом соответствуют рабочие поверхностные зоны покрытий.

Итак, наблюдается стабильное распределение твердой оксидной фазы в объемах напыленных материалов и отсутствуют поверхностные зоны с дефицитом таких включений, что положительно влияет на работоспособность исследуемых износостойких покрытий. При плазменном напылении порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$) формируется покрытие с более высокой микротвердостью, по сравнению с порошками $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{MoS}_2\text{-Ni}$), что обусловлено снижением пористости и повышением однородности покрытий.

На плотность покрытий, характер распределения фаз, а также на прочностные характеристики (износостойкость и прочность сцепления) большое влияние оказывает зернистость покрытий.

Результаты фрактографического анализа изломов покрытий показывают, что использование для напыления порошков, состоящих из мелкодисперсных частиц, приводит к формированию более мелкозернистой структуры (рис. 10).

Таблица 1

Микротвердость напыленных покрытий
Micro-hardness of sprayed coatings

Покрытие	Микротвердость, МПа, для пояса замеров по длине поперечного сечения покрытия				
	1	2	3	4	5
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$)	5764–8182	5564–8649	5877–8805	5945–8950	6027–9014
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\%$ ($\text{MoS}_2\text{-Ni}$)	5707–8644	5836–8850	5902–8944	6121–9145	6253–9247



Рис. 10. Поверхность излома покрытия из порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2\text{-Ni}) (\times 10000)$

Fig. 10. Fracture of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ -powder coating – 15 % ($\text{CaF}_2\text{-Ni}$) ($\times 10000$)

Структура покрытия из порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2\text{-Ni})$ – ламинарная с ярко выраженной гетерогенностью, о чем свидетельствуют изменение окраски оксидных ламелей по сечению от светло- до темно-серой и увеличение микротвердости от 6070 до 11900 Н/мм², в них находятся включения твердой смазки (черного цвета). Согласно результатам рентгеноспектрального флуоресцентного анализа, покрытие $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2\text{-Ni})$ состоит из Al_2O_3 , легированных титаном и хромом, эвтектики $\text{Al}_2\text{Cr-TiO}_5$, TiO_2 , Ti_3O_5 , комплексные оксиды Ti-Cr-Al-Ca-O , CaF_2 . Исследования показали, что при напылении агломерированных порошков происходит недостаточное взаимодействие между Cr_2O_3 , Al_2O_3 и TiO_2 . Таким образом, при остывании расплава на подложке формируется эвтектика $\text{Al}_2\text{Cr-TiO}_5$, обладающая наименьшей межфазной энергией образования. Результаты проведенных исследований структуры и фазового состава покрытий позволяют сделать вывод о том, что технология изготовления порошка оказывает превалирующее влияние на формирование структуры покрытия.

ВЫВОДЫ

1. Проведена оптимизация параметров APS (плазменное напыление на воздухе) процесса для материалов NiAl , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2\text{-Ni})$ и $\text{FeCr30Mo3} - 12\% \text{CaF}_2 - 50\% \text{TiC}$. Ее осуществляли на основании получения максимального коэффициента использования ма-

териала. Проведены исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка на характеристики покрытий.

2. Структура покрытий, их химический и фазовый составы оказывают определяющее влияние на физико-механические свойства покрытий, в частности на пористость, прочность сцепления и износостойкость.

3. Структура покрытия из порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2 - 15\% (\text{CaF}_2\text{-Ni})$ – ламинарная с ярко выраженной гетерогенностью, о чем свидетельствуют изменение окраски оксидных ламелей по сечению от светло- до темно-серой и увеличение микротвердости от 6070 до 11900 Н/мм², в них находятся включения твердой смазки (черного цвета).

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. М.: Наука, 1990. 406 с.
2. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. Екатеринбург: Наука, 1994. 317 с.
3. Куприянов, И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. Минск: Навука і тэхніка, 1990. 175 с.
4. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. М.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1985. 197 с.
5. Ильющенко, А. Ф. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. Минск: Беспринт, 2005. 253 с.
6. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов. Минск: Белорусская наука, 2006. 435 с.
7. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Порошковая металлургия: республик. межвед. сб. науч. тр. / Национальная академия наук Беларуси. Минск: Белорусская наука, 2008. Вып. 31. С. 156–162.
8. Оковитый, В. А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки / В. А. Оковитый // Сварочное производство. 2002. № 6. С. 41–43.
9. Триботехнические испытания образцов аморфизированных плазменных композиционных покрытий с включением твердой смазки / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. 2008. Вып. 1. С. 2–6.

10. Керамический материал системы оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. 2011. Вып. 1. С. 16–20.
11. Оковитый, В. А. Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. Т. 67, № 2. С. 46–54.
12. Разработка композиционного материала на основе многофункциональной керамики для плазменного напыления / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. Машиностроение. 2015. Вып. 2. С. 43–47.
13. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый [и др.] // Обработка металлов. 2015. Т. 67, № 2. С. 39–45.
14. Исследование процессов и оптимизация технологических параметров импульсно-плазменной обработки плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении». Кемерово, 2015. С. 360–364.
- Поступила 11.09.2017
Подписана в печать 16.11.2017
Опубликована онлайн 29.05.2018
- REFERENCES
1. Kudinov V. V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V. E., Kovalenko L. V. (1990) *Plasma Coatings*. Moscow, Nauka Publ. 406 (in Russian).
2. Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Gas Thermal Coatings*. Ekaterinburg, Nauka Publ. 317 (in Russian).
3. Kupriyanov I. L., Geller M. A. (1990) *Gas Thermal Coatings with Increased Adhesion Strength*. Minsk, Navuka i Tekhnika. 254 (in Russian).
4. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Gas-Thermal Spraying of Composite Powder*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 197 (in Russian).
5. Iyushchenko A. F., Okovity V. A., Shevtsov A. I. (2005) *Formation of Wear-Resistant Plasma Coatings on the Basis of Composite Self-Lubricating Materials*. Minsk, Besprint Publ. 253 (in Russian).
6. Vityaz P. A., Iyushchenko A. F., Shevtsov A. I. (2006) *Fundamentals for Application of Wear-Resistant, Corrosion-Resistant and Heat-Resistant Coatings*. Minsk, Beloruskaya Nauka Publ. 435 (in Russian).
7. Okovityi V. A., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I., Panteleenko F. I., Okovityi V. V. (2008) Obtaining of Composite Ceramic Material for Application of Wear-Resistant Coatings. *Poroshkovaya Metallurgiya: Respublikanskii Mezhdovomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy: the Republican Interdepartmental Collection of Scientific Works, 31, 156–162 (in Russian)].
8. Okovity V. A. (2002) Plasma Wear-Resistant Coatings with Inclusion of Solid Lubricant. *Svarochnoe Proizvodstvo*, (6), 41–43 (in Russian).
9. Okovityi V. A., Shevtsov A. I., Ilyushchenko A. F., Devoino O. G., Panteleenko F. I., Okovityi V. V. (2008) Tribotechnical Tests of Samples of Amorphized Plasma Composite Coatings with Inclusion of Solid Lubricant. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Mashinostroenie* [Bulletin of Brest State Technical University. Mechanical Engineering], (1), 2–6 (in Russian).
10. Okovityi V. A., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovityi V. V. (2011) Ceramic Material of Titanium Oxide-Aluminium Oxide-Solid Lubricant System. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (1), 16–20.
11. Okovity V. A., Panteleenko F. I. (2015) Optimization of Process for Deposition of Wear-Resistant Coatings Based on Multifunctional Oxide Ceramics. *Obrabotka Metallov = Metal Working and Material Science*, 67 (2), 46–54 (in Russian).
12. Panteleenko F. I., Okovityi V. A., Devoino O. G., Astashinskii V. M., Okovityi V. V. (2015) Development of Composite Material Based on Multifunctional Ceramics for Plasma Deposition. *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, (2), 43–47 (in Russian).
13. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Talako T. L., Panteleenko A. F. (2015) Technology for Obtaining Composite Material on the Basis of Multifunctional Oxide Ceramics. *Obrabotka Metallov = Metal Working and Material Science*, 67 (2), 39–45 (in Russian).
14. Panteleenko F. I., Okovityi V. A., Devoino O. G., Astashinskii V. M., Okovityi V. V. (2015) Investigation on Processes and Optimization of Technological Parameters for Pulse-Plasma Processing of Plasma Coatings Based on Multi-Functional Oxide Ceramics. *Innovatsii v Mashinostroenii (InMash-2015): VII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 23–25 Sent. 2015 g., Kemerovo: Sbornik Trudov* [Innovations in Mechanical Engineering (InMash-2015): VII International Scientific and Practical Conference, September 23–25, 2015, Kemerovo. Proceedings]. Kemerovo, Kuzbass State Technical University, 360–364 (in Russian).

Received: 11.09.2017

Accepted: 16.11.2017

Published online: 29.05.2018