

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ ENGINEERING TECHNOLOGY

Научная статья

УДК 621.793.71

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-1-12-22

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЕВЫХ М-КРОЛЕЙ

Пантелеенко Федор Иванович¹, Оковитый Вячеслав Александрович¹,
Сидоров Виктор Александрович¹, Оковитый Василий Вячеславович¹,
Асташинский Валентин Миронович², Францишек Свитала³,
Блюменштейн Валерий Юрьевич⁴

¹ Белорусский национальный технический университет

² Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

³ Самарский государственный технический университет

⁴ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: panteleyenkofit@tut.by



Информация о статье

Поступила:

15 декабря 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 января 2022 г.

Принята к публикации:

25 февраля 2022 г.

Ключевые слова:

плазменная струя,
оптимизация процесса,
коэффициент использования
порошка, плазменные
компрессионные потоки,
эксплуатационные
характеристики.

Аннотация.

В статье приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи на характеристики многослойных композиционных покрытий на основе никель-хрома, никель-хром-алюминий-иттрия и оксидов алюминия и титана. При процессе получения напыленных износостойких слоев из разработанных порошковых материалов присутствует большое количество факторов технологического процесса, влияющих на свойства создаваемых защитных покрытий. Основные факторы – скорость устройств перемещения плазменной горелки или подложки, применяемая дистанция для напыления, расход используемого плазмообразующего и транспортирующего газов, расход материала, применяемого при распылении, подводимая мощность, зависящая от напряжения и тока электрической дуги плазмотрона. Проведена оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования порошка. Приведены результаты исследований морфологии сформированных покрытий, выполненных с использованием растровой электронной микроскопии.

Для цитирования: Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М., Францишек С., Блюменштейн В.Ю. Выбор оптимальных параметров нанесения многослойных плазменных покрытий из материалов на основе никелевых м-кролей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 1 (149). С. 12-22. doi: 10.26730/1999-4125-2022-1-12-22



Рис. 1. Распыленная частица $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y$ на подложке ($\times 400$)

Fig. 1. Atomized particle $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y$ on a substrate ($\times 400$)

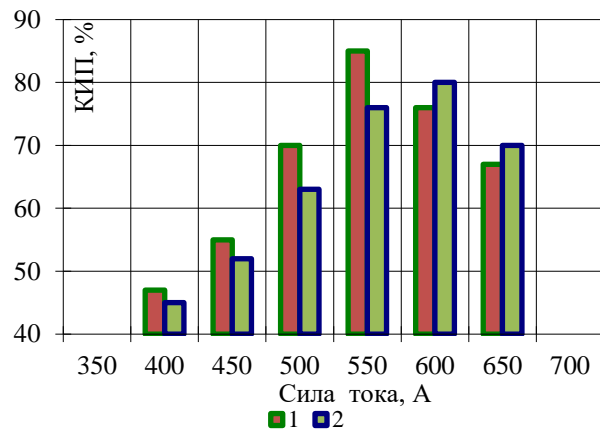


Рис. 2. Влияние на показатели КИП, % значений показателей подводимого тока плазматрона (I , А) для порошкового материала подслоя: 1 – $NiCrAlTiTa$ ($R_{пор.}=4,0$ кг/час, фракция порошка 40-63 мкм, $RN=45$ л/мин; $L=100$ мм); 2 – фракция порошка 63-80 мкм

Fig. 2. Influence on the parameters of the KIP, % values of the parameters of the supplied current of the plasma torch (I , А) for the powder material of the sublayer: 1 – $NiCrAlTiTa$ ($R_{пор.}=4.0$ kg / h, powder fraction 40-63 microns, $RN=45$ l / min; $L=100$ mm); 2 – powder fraction

оплавленных слоев толщиной 30-100 мкм [11-15]. Вместе с тем для окончательных выводов и решений, направленных на успешное внедрение упомянутых покрытий, целесообразно изучить перспективы синтеза новых композиционных порошков из металлокерамики и разработать критерии прогнозирования свойств покрытий из них, полученных плазменным напылением, а также исследовать и оптимизировать технологические параметры плазменного напыления композиционных порошков.

В рамках данной работы особое внимание будет уделено вопросам влияния формируемой структуры на физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий на основе сплавов $MCrAlYTa$, армированных оксидами (например, Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$). Чистые $MCrAlYTa$ не подходят для трибологических применений, потому что их низкая твердость может привести к очень сильному износу в условиях скользящего контакта, особенно на этапах приработки при

Введение. На основе анализа современного применения и особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что данные композиции (оксид-металлическая составляющая) используются в качестве диэлектрических, теплозащитных и износостойких покрытий [1-8].

Предлагаемое нами направление исследований касается технологии формирования покрытий с повышенной износостойкостью для улучшения эксплуатационных характеристик у деталей трибосопряжений, работающих в тяжелых условиях при повышенных нагрузках в отсутствие смазочного материала, колебаниях температурных показателей (моторостроение, металлургическое оборудование, авиационная и космическая техника) [1-14]. Согласно результатам проведенных исследований, для таких условий эффективны покрытия, наносимые плазменным напылением с последующей высокоэнергетической обработкой импульсами плазмы (лазерного излучения) [9-11]. К факторам износостойкости в данном случае относится состав композиционных частиц исходных порошков, обеспечивающий эффективную структуру покрытий. Кроме того, высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий обеспечивает их упрочнение за счет уплотнения и формирования измельченной (нанокристаллической), неравновесной (аморфной) структуры при сверхбыстром охлаждении

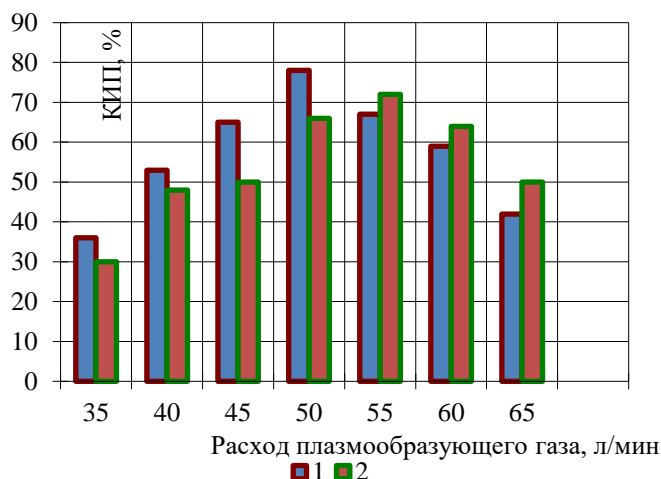


Рис. 3. Влияние на показатели КИП, % дистанции формирования покрытий L , мм для материала промежуточного подслоя: 1 – NiCrAlTa $R_{пор.}=4,5$ кг/час, фракция порошка 40-63 мкм, $R_N=45$ л/мин; $I=550$ А); 2 – фракция порошка 63-80 мкм.

Fig. 3. Influence on the indicators of the statue, % of the distance of the coating formation L , mm for the material of the industrial mean: 1 – NiCrAlTa $R_{por.}=4.5$ kg / h, powder fraction 40-63 microns, $R_N=45$ l / min; $I=550$ a); 2 – powder fraction 63-80 microns

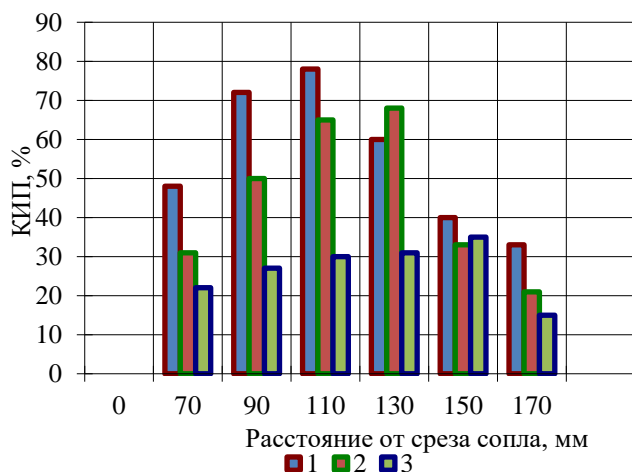


Рис. 4. Влияние на показатели КИП, % дистанции формирования покрытий L , мм для порошкового материала износостойкого слоя: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ (фракция 40...63 мкм; $I=500$ А, $R_N=45$ л/мин, $R_{пор.}=4,5$ кг/час); 2 – фракция 63-80 мкм; 3 – фракционный состав – 80-100 мкм

Fig. 4. Influence on the KIP indicators, % of the coating formation distance L , mm for the powder material of the wear-resistant layer: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ (fraction 40...63 microns; $I=500$ A, $R_N=45$ l / min, $R_{pore}=4.5$ kg / hour); 2 – fraction of 63-80 microns; 3 – fractional composition-80-100 microns

низких температурах. Поэтому изготовление композитных покрытий на основе сплавов $MCrAlYTa$, армированных оксидами, представляется необходимым решением для того, чтобы связать стойкость металла к окислению с твердостью и химической стабильностью керамической фазы [3-12].

Технология нанесения многослойных плазменных покрытий из материалов на основе никелевых м-кролей. В соответствии с разработанной нами методикой оптимизацию плазменного напыления порошковых покрытий на установке плазменного напыления на воздухе осуществляли по коэффициенту использования распыляемого порошкового материала (КИП). При этом учитывали также морфологию отдельных наносимых на отполированную поверхность частиц порошковых материалов после их взаимодействия с основой (подложкой) («Splat-test») (рис. 1). По результатам осмотра под микроскопом для аналогичных «Splat-test» технологических режимов осуществлялся процесс оптимизации на базе создания покрытий с максимальным КИП (коэффициента использования порошкового материала).

При процессе получения напыленных износостойких слоев из разработанных порошковых материалов присутствует большое количество факторов технологического процесса, влияющих на свойства создаваемых защитных покрытий. Основные факторы- скорость устройств перемещения плазменной горелки или подложки, применяемая дистанция для напыления, расход используемого плазмообразующего и транспортирующего газов, расход материала, применяемого при распылении, подводимая мощность, зависящая от напряжения и тока

электрической дуги плазмотрона [12-17]. В качестве примера на рис. 2-8 показаны характерные

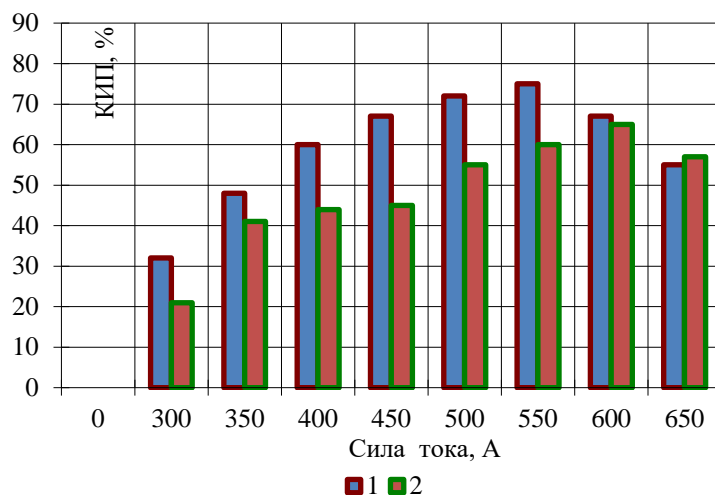


Рис. 6. Влияние показателей КИП, % на значения показателей подводимого тока плазмотрона для порошковых материалов износостойких слоев: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ ($L=110$ мм; $R_N=50$ л/мин, фракция 40-63 мкм); 2 – фракция 63-80 мкм

Fig. 6. Influence of KIP indicators, % on the values of the plasma torch input current indicators for powder materials of wear-resistant layers: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ ($L=110$ mm; $R_N=50$ l/min, fraction 40-63 microns); 2 – fraction 63-80 microns

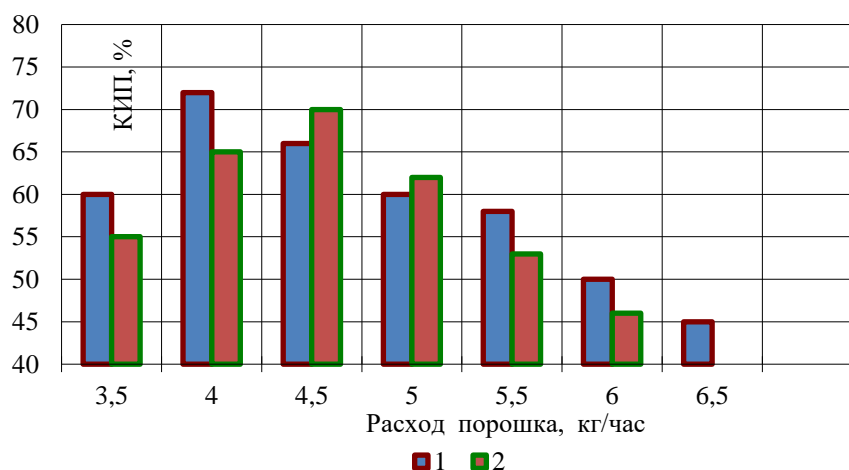


Рис. 7. Влияние показателей КИП, % на расход порошкового материала для формирования износостойких слоев: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ ($L=110$ мм; $I=500$ А, с фракцией 40-63 мкм); 2 – с фракцией 63-80 мкм

Fig. 7. Influence of KIP indicators, % on the consumption of powder material for the formation of wear-resistant layers: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ ($L=110$ mm; $I=500$ A, with a fraction of 40-63 microns); 2 – with a fraction of 63-80 microns

зависимости, которые с помощью КИП-универсальной характеристики показывают влияние на эффективность процесса перечисленных условий и режимов напыления. Произведена качественная оптимизация всех важнейших параметров APS (плазменное напыление в условиях атмосферы) процесса создания износостойких покрытий из порошковых материалов $NiCrAlTa$ (для создания подслоев), а также $NiCrAlTa-Al_2O_3-TiO_2$ (для создания износостойких слоев). Она проводилась поэтапно. Первый этап – для фиксированных показателей тока дуги и формирующего плазму азота варьировались дистанции для создания покрытий. Второй этап – изменение количества формирующего плазму азота при неизменных дистанциях напыления порошкового материала и значения применяемого тока. Затем на третьем этапе для определенных постоянных значений дистанции напыления порошкового материала и расходах плазмообразующего газа-азота мы изменяли величины подводимого тока. Для $NiCrAlTa$ (ток

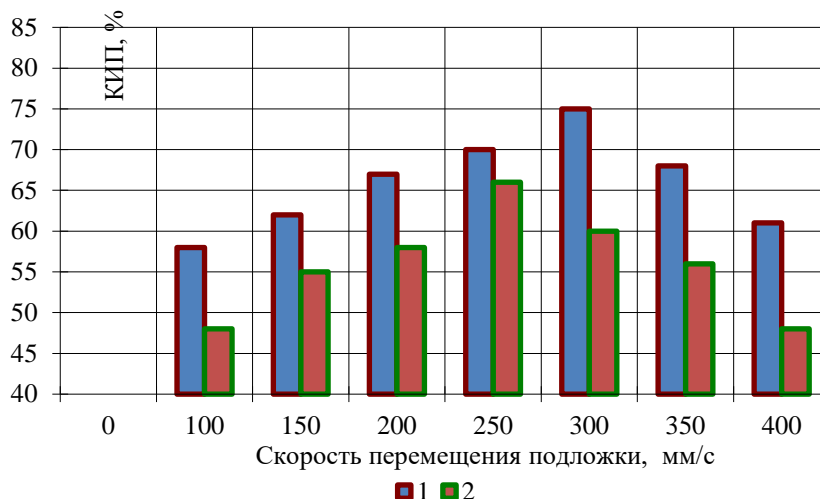


Рис. 8. Влияние показателей КИП, % на скорость при перемещении основы для порошковых материалов износостойких слоев: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ ($L=110$ мм; $I=500$ А; $R_{пор.}=4,5$ кг/час, с фракцией 40-63 мкм); 2 – с фракцией 63-80 мкм

Fig. 8. Impact indicators of KIP, % on the speed when moving the bases for powder materials, the values of the layers: 1 – $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ ($L=110$ mm; $I=500$ A; $R_{por.}=4.5$ kg / hour, with a fraction of 40-63 microns); 2 – with a fraction of 63-80 microns

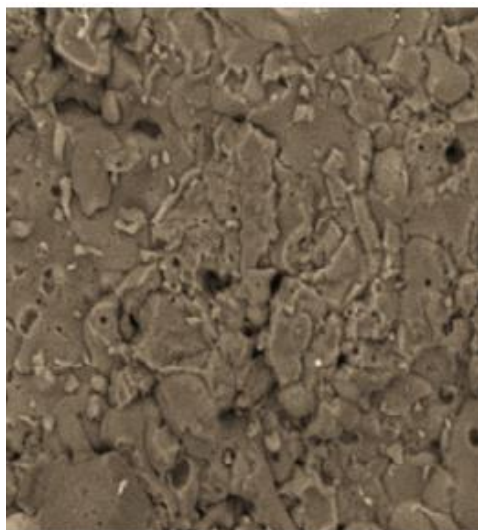


Рис. 9. Изображения участков поверхности сформированного износостойкого покрытия из порошкового материала $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ при увеличении $\times 1000$

Fig. 9. Images of the surface areas of the formed wear-resistant coating made of $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ powder material at magnification $\times 1000$

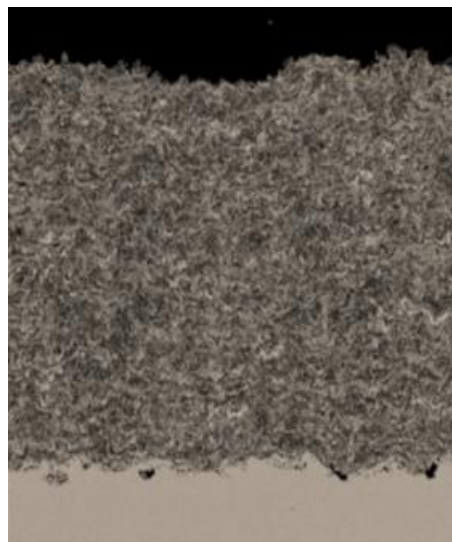


Рис. 10. Микроструктура поперечного сечения напыленных композитных покрытий $NiCrAlTa / Al_2O_3-TiO_2$

Fig. 10. Microstructure of the cross-section of the sprayed composite coatings $NiCrAlTa / Al_2O_3-TiO_2$

дуги плазменной горелки – 550 А, скорость при перемещении основы $V_{подл.}=300$ мм /с, расход формирующего плазму азота – 45 л/мин, дистанция для формирования покрытия – 100 мм, фракционный состав порошкового материала – 40-63 мкм, расход порошкового материала – 4,0 кг/час) сформирован подслоем покрытия с КИМ – 85 %. Для $NiCrAlTa-Al_2O_3-TiO_2$ – износостойкий слой (ток дуги плазменной горелки – 550 А, скорость при перемещении основы $V_{подл.}=300$ мм/с, расход формирующего плазму азота – 50 л/мин, дистанция для формирования покрытия – 110 мм, фракционный состав порошкового материала – 40-63 мкм, расход порошкового материала – 4,0 кг/час) – сформирован подслоем покрытия с КИМ – 80 %.

При указанных значениях технологических параметров формируется микрогетерогенная структура напыленного покрытия, содержащая элементы, обеспечивающие его износостойкость

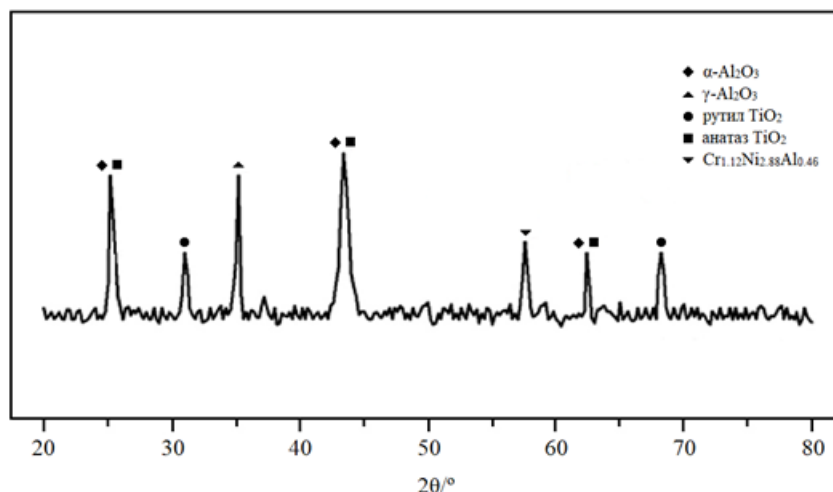


Рис. 11. Рентгенограмма покрытия NiCrAlYTa-Al₂O₃-TiO₂
 Fig. 11. X-ray image of the NiCrAlYTa- Al₂O₃-TiO₂ coating

(Cr_{1,12}Ni_{2,88}, α-Al₂O₃, γ-Al₂O₃, орторомбическая фаза оксида титана TiO₂, соединения Mo). При этом, как видно из рис. 1, достигается растекание расплавленных частиц на подложке, отсутствует их разбрызгивание и потери при соударении с подложкой.

Исследование структуры и свойств напыленных при оптимальных режимах плазменных порошковых покрытий из керамики с применением добавок тугоплавких металлов

На рис. 9 показан внешний вид покрытия Al₂O₃-TiO₂-NiCrAlYTa, нанесенного плазменным напылением. Из рисунка видно, что покрытие имеет хорошую плотность, и никаких поверхностных дефектов, таких, как трещины, не видно. Керамические агрегаты Al₂O₃-TiO₂ связаны друг с другом, и часть крупногабаритных керамических частиц внедряется в расплавленные NiCrAlYTa покрытия. Такие микроструктурные характеристики связаны с подвижностью расплавленных жидкофазных NiCrAlYTa составляющих, которые могут заполнять промежутки и трещины, возникающие при плазменном напылении оксидного покрытия, и улучшать плотность покрытия. На рис. 10 показаны микроструктуры композиционных покрытий NiCrAlYTa / Al₂O₃-TiO₂-NiCrAlYTa мас. %. Анализ микроструктур показывает, что керамическая фаза Al₂O₃-TiO₂ выглядит темно-серой, а фаза NiCrAlYTa – светло-серой. Из микроструктуры видно, что композитные покрытия являются плотными и однородными, можно наблюдать поры, в то время как качество межконтактных контактов хорошее для всех покрытий. Можно также заметить, что NiCrAlYTa в покрытиях присутствует в виде тонких пластин.

Как показано на рисунке 10, структуры частиц являются результатом переплавленных или не расплавленных частиц исходного сырья. Пластинчатые микроструктуры указывают на то, что расплавленные капли еще не затвердели до удара, воздействуя на подложку или ранее осажденные слои с высокой скоростью. Степень плавления частиц в значительной степени определяет пористость, микротвердость и последующие свойства покрытия. Заметно, что на границе подложка-покрытие присутствует взаимно смещенная структурная сетка. Граница не является четко определенной, что указывает на то, что в процессе высокотемпературного напыления керамические составляющие покрытия плавятся в органическое целое с металлической составляющей в области границы раздела, и что элементы двух составляющих диффундируют и проникают друг в друга, нет очевидных границ между слоистыми структурами. Помимо химической и механической связи, существуют некоторые металлургические связи. На рис. 11 показаны рентгенограммы покрытия NiCrAlYTa-Al₂O₃-TiO₂. Из рентгенограммы видно, что основными кристаллическими фазами в системе покрытия являются γ-Al₂O₃, анатаз (TiO₂), фаза Cr_{1,12}Ni_{2,88}, в дополнении к α-Al₂O₃ и рутила TiO₂. Дифракционные пики рутила TiO₂ обнаруживаются около 2θ=32° и 2θ=70°, его содержание увеличивается после распыления, что свидетельствует о том, что переход из фазы анатаза в рутильную фазу TiO₂ происходит при высокой температуре [15-20]. Согласно результатам количественного анализа, содержание α-

Al_2O_3 и анатаза TiO_2 составляет 30,4% и 32,2% соответственно; они составляют основные фазовые структуры высокотемпературных керамических покрытий.

Выводы

Произведена оптимизация всех важнейших параметров APS (плазменное напыление в условиях атмосферы) процесса создания износостойких покрытий из порошковых материалов NiCrAlTiTa (для создания подслоев), а также NiCrAlTiTa- Al_2O_3 - TiO_2 (для создания износостойких слоев). При оптимальных технологических параметрах формируется микрогетерогенная структура напыленного покрытия, содержащая элементы, обеспечивающие его износостойкость ($\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, α - Al_2O_3 , γ - Al_2O_3 , орторомбическая фаза оксида титана TiO_2 , соединения Mo). Покрытие имеет хорошую плотность без поверхностных дефектов, керамические агрегаты Al_2O_3 - TiO_2 связаны друг с другом, и часть крупногабаритных керамических частиц внедряется в расплавленные NiCrAlTiTa покрытия. Такие микроструктурные характеристики связаны с подвижностью расплавленных жидкофазных NiCrAlTiTa составляющих, которые могут заполнять промежутки и трещины, возникающие при плазменном напылении оксидного покрытия, и улучшать плотность покрытия. Пластинчатые микроструктуры указывают на то, что распрысканные капли еще не затвердели до удара, воздействуя на подложку или ранее осажденные слои с высокой скоростью. Степень плавления частиц в значительной степени определяет пористость, микротвердость и последующие свойства покрытия. Заметно, что на границе подложка-покрытие присутствует взаимно смещенная структурная сетка. Основными кристаллическими фазами в системе покрытия являются γ - Al_2O_3 , анатаз (TiO_2), фаза $\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, в дополнении к α - Al_2O_3 и рутила TiO_2 . Дифракционные пики рутила TiO_2 обнаруживаются около $2\theta=32^\circ$ и $2\theta=70^\circ$, его содержание увеличивается после распыления, что свидетельствует о том, что переход из фазы анатаза в рутильную фазу TiO_2 происходит при высокой температуре. Согласно результатам количественного анализа, содержание α - Al_2O_3 и анатаза TiO_2 составляет 30,4% и 32,2% соответственно; они составляют основные фазовые структуры высокотемпературных керамических покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Okovity V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant // J. Welding International. 2003. Vol. 16, № 11. P. 918-920.
2. Пысченко А., Шевтсов А., Оковитый В. и другие. Investigation of composite powders with a carbide phase for plasma spraying of wear resistant coating // Thermal Spray 2001: Proceedins of the International Thermal Spray Conference. 2001. Singapore P. 1119-1121.
3. Okovity V., Пысченко А., Шевтсов А. Deposition of underlayer for heat shifld coatings by methods of thermal spraying // Danube Adria Association For Automation & Manufacturing: Proc. of the 3-st International Conference. Tallinn (Estonia). 2002. P. 197-200.
4. Шевтсов А., Оковитый В., Асташинский В. Modification of thermal sprayed wear-resistant composite coatings by pulsed plasma flow // Proceedings of the 4-th International Conference «Plasma physics and plasma technology». Minsk. 2003. Vol. 2. P. 681-621.
5. Пысченко А., Шевтсов А., Оковитый В., Буикус К. Investigation of sprayed composite powder particles with hard lubricant spreading on the substrate // Euro PM 2004 hard materials proceedings. Vena. 2004. P. 1117-1120.
6. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Пантелеенко А. Ф., Оковитый В. В. Разработка композиционного материала на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки для газотермического напыления // «Наука и техника». БНТУ : Минск, 2012. Вып. 4. С.17-22.
7. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Талако Т. Л., Девойно О. Г., Пантелеенко А. Ф., Оковитый В. В. Исследование структуры плазменных износостойких покрытий на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки // «Наука и техника». БНТУ : Минск, 2013. Вып. 5. С. 15-21.
8. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Девойно О. Г., Пантелеенко А. Ф., Оковитый В. В. Исследование процессов обработки импульсами лазерного излучения плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики // «Наука и техника», БНТУ : Минск. 2014. Вып. 4. С.3-10.
9. Okovity V. A., Shevtsov A. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Kostyukevich E. A. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics // High Temperature Material Processes. 2014. №18(1-2). P. 45-62 .
10. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Асташинский В. М., Оковитый В. В. Разработка

композиционного материала на основе многофункциональной керамики для плазменного напыления // «Упрочняющие технологии и покрытия». М. : Машиностроение. 2015. Вып. 2. С.43-47.

11. Оковитый В. А., Пантелеенко А. Ф. Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной оксидной керамики // «Обработка металлов», Новосибирск. 2015. №2(67). С.46-54.

12. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Талако Т. Л., Пантелеенко А. Ф. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики // «Обработка металлов», Новосибирск. 2015. №2(67). С. 39-45.

13. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А. Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов // БНТУ : Минск. 2019. 231 с.

14. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Оковитый В. В. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой // «Наука и техника». БНТУ : Минск. 2018. Вып. 3. С.183-189.

15. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. В. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями // «Наука и техника». БНТУ : Минск. 2018. Вып. 5. С.377-389.

16. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Astashinsky V. M. Sobolevsky S. B., Okovity V. V. Analysis and selection of possible options for spraying composite multilayer coatings from ceramic powders on protective screens // Fundamental and applied problems of engineering and technology. №4-2(336). 2019. P. 166-171.

17. Оковитый В. А., Девойно О. Г., Асташинский В. М., Оковитый В. В. Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления // «Наука и техника», БНТУ : Минск. 2017. Вып.3. С.193-199.

18. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Сидоров В. А., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Разработка принципов модификации высокоэнергетическим плазменным воздействием покрытий из керамики с применением добавок тугоплавких металлов // Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». ДонНТУ : Донецк. Вып. 1(68). 2020. С. 61-66.

19. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Соболевский С. Б., Оковитый В. В. Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием // «Наука и техника». БНТУ : Минск. 2020. Вып. 6. С.615-620.

20. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Astashinsky V. M., Devoino O. G., Okovity V. A. Development of principle of modification by high energy plasma exposure of coatings from ceramics with the application of additives of refining metals // Тезисы XXVII междунар. научно-техн. конф. «Машиностроение и техносфера 21 века». Севастополь. С. 436-439.

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Пантелеенко Алексей Федорович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), чл.-кор. НАН Б, доктор техн. наук, профессор, panteleyenkofi@tut.by

Оковитый Вячеслав Александрович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), кандидат техн. наук, niil_svarka@bntu.by

Сидоров Виктор Александрович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), чл.-кор. НАН Б, доктор техн. наук, профессор, panteleyenkofi@tut.by

Оковитый Василий Вячеславович, Инженер, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

Асташинский Валентин Миронович, Белорусский национальный технический университет (220072, Минск, п. Бровки, 15, Беларусь), чл.-кор. НАН Б, доктор физ.-мат. наук, профессор, ast@hmti.ac.by

Францишек Свитала, Самарский государственный технический университет, (Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия), профессор

Блюменштейн Валерий Юрьевич, профессор кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), докт. техн. наук, профессор, blumenstein.vu@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Пантелеенко Ф.И. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Оковитый В.А. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Сидоров В.А. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Оковитый В.В. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Асташинский В.М. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Францишек С. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Блюменштейн В.Ю. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS FOR APPLYING MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM MATERIALS BASED ON NICKEL M-CROUL

Fyodor I. Panteleenko¹, Vyacheslav A. Okovity¹,
Viktor A. Sidorov¹, Vasily V. Okovity¹,
Valentin M. Astashinsky², Switala Franciszek³
Valery Yu. Blumenstein⁴

¹Belarusian National Technical University,

²Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus

³Samara Technical University, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, Russia

⁴T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: panteleyenkofi@tut.by

**Article info**

Submitted:

15 December 2021

Approved after reviewing:

30 January 2022

Accepted for publication:

25 February 2022

Abstract.

The article presents the results of a study of the influence of plasma jet parameters on the characteristics of multilayer composite coatings based on nickel-chromium, nickel-chromium-aluminum-yttrium and aluminum and titanium oxides. In the process of obtaining sprayed wear-resistant layers from the developed powder materials, there are a large number of process factors that affect the properties of the created protective coatings. The main factors are the speed of the devices for moving the plasma burner or substrate, the distance used for spraying, the consumption of the plasma-forming and transporting gases used, the consumption of the material used for spraying, the power supplied, depending on the voltage and current of the electric arc of the plasma torch. Optimization was carried out on the basis of obtaining the maximum utilization factor of the powder. The results of studies of the

Keywords: *plasma jet, process optimization, powder utilization coefficient, plasma compression flows, operational characteristics morphology of the formed coatings performed using scanning electron microscopy are presented.*

For citation Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Franciszek S., Blumenstein V.Yu. Selection of optimal parameters for applying multilayer plasma coatings from materials based on nickel m-croul. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022; 1(149):12-22. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-1-12-22

REFERENCES

1. Okovity V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant. *J. Welding International*. 2003;16(11): 918-920.
2. Ilyuschenko A, Shevtsov A, Okovity V and other. Investigation of composite powders with a carbide phase for plasma spraying of wear resistant coating. *Thermal Spray 2001: Proceedins of the International Thermal Spray Conference*. Singapore. 2001. P. 1119-1121.
3. Okovity VA, Ilyuschenko APh, Shevtsov AI. Deposition of underlayer for heat shifld coatings by methods of thermal spraying. *Danube Adria Association For Automation & Manufacturing: Proc. of the 3rd International ConferenceTallinn*. Estonia. 2002. P. 197-200.
4. Shevtsov A, Okovity V, Astashynsky V. Modification of thermal sprayed wear-resistant composite coatings by pulsed plasma flow. *Proceedings of the 4th Intern. Conf. «Plasma physics and plasma technology»*. Minsk. 2003;2: 681-621.
5. Ilyuschenko A, Shevtsov A, Okovity V, Buikus K. Investigation of sprayed composite powder particles with hard lubricant spreading on the substrate. *Euro PM 2004 hard materials proceedings*. Vena. 2004. P. 1117-1120.
6. Panteleenko FI, Okovity VA, Devoino OG, Panteleenko AF, Okovity VV. Development of a composite material based on oxide ceramics with solid lubricant inclusions for thermal spraying. *«Science and technology»*. BNTU : Minsk. 2012; 4: 17-22.
7. Panteleenko FI, Okovity VA, Talako TL, Devoino OG, Panteleenko AF, Okovity VV. Investigation of the structure of plasma wear-resistant coatings based on oxide ceramics with solid lubricant inclusions. *«Science and technology»*. BNTU : Minsk. 2013;5: 15-21.
8. Okovity VA, Panteleenko FI, Devoino OG, Panteleenko AF, Okovity VV. Investigation of the processing of plasma coatings from materials based on multifunctional oxide ceramics by laser radiation pulses. *«Science and technology»*. BNTU : Minsk,. 2014;4: 3-10.
9. Okovity VA, Shevtsov AI, Okovity VV, Astashinsky VM, Kostyukevich EA. *High Temperature Material Processes*. 2014; 18(1-2): 45-62.
10. Panteleenko FI, Okovity VA, Devoino OG, Astashinsky VM, Okovity VV. Development of a composite material based on multifunctional ceramics for plasma spraying. *«Strengthening technologies and coatings»*, Mechanical engineering. Moscow. 2015; 2: 43-47.
11. Okovity VA, Panteleenko AF. Optimization of the spraying process of wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics. *«Processing of metals»*. Novosibirsk. 2015; 2(67): 46-54.
12. Okovity VA, Panteleenko FI, Talako TL, Panteleenko AF. Technology for obtaining a composite material based on multifunctional oxide ceramics. *Metalworking*. Novosibirsk. 2015; 2(67): 39-45.
13. Panteleenko FI, Okovity VA. Formation of multifunctional plasma coatings based on ceramic materials. BNTU : Minsk. 2019. 231 p.
14. Okovity VA, Panteleenko FI, Astashinsky VM, Okovity VV. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a non-equilibrium structure. *Science and Technology*. BNTU : Minsk. 2018;3: 83-189.
15. Okovity VA, Panteleenko FI, Okovity VV, Astashinsky VM, Uglov VV. Formation and study of plasma powder coatings from oxide ceramics modified by high-energy effects. *«Science and Technology»*. BNTU : Minsk. 2018. P. 377-389.
16. Panteleenko FI, Okovity VA, Astashinsky VM, Sobolevsky SB, Okovity VV. Analysis and selection of possible options for spraying composite multilayer coatings from ceramic powders on protective screens. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2019; 4-2(336): 166-171.
17. Okovity VA, Devoino OG, Astashinsky VM, Okovity VV. Obtaining composite ceramic material for thermal spraying. *«Science and Technology»*. BNTU : Minsk. 2017;3: 193-199.
18. Panteleenko FI, Okovity VA, Devoino OG, Sidorov VA, Okovity VV, Astashinsky VM. Development of principles for modification of ceramic coatings by high-energy plasma action using additives of refractory metals.

International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University «Progressive technologies and systems of mechanical engineering». DonNTU : Donetsk. 2020;1(68): 61-66.

19. Okovity VA, Panteleenko FI, Astashinsky VM, Sobolevsky SB, Okovity VV. Formation of plasma powder coatings from cermets with subsequent high-energy modification. *Science and Technology*. BNTU : Minsk. 2020; 6: 615-620.

20. Panteleenko FI, Okovity VA, Astashinsky VM, Devoino OG, Okovity VA. Development of principle of modification by high energy plasma exposure of coatings from ceramics with the application of additives of refining metals. *Abstracts of the XXVII International Scientific and Technical Conference «Engineering and Technosphere of the 21st Century»*. Sevastopol. 2020. P. 436-439.

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Fyodor I. Panteleenko, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), member-cor.NAS of Belarus, Dr. S. in Engineering, prof., panteleyenkofi@tut.by

Vyacheslav A. Okovity, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), C. Sc. in Engineering, niil_svarka@bntu.by

Viktor A. Sidorov, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), C. Sc. in Engineering, va_sidorov@tut.by

Vasily V. Okovity, Senior engineer, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus)

Valentin M. Astashinsky, 2Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus (220072, Minsk, Brovka, 15), member-cor.NAS of Belarus, Dr. Sc. in Physics and Mathematics, ast@hmti.ac.by

Switala Franciszek, Samara State Technical University (Samara, Molodogvardeyskaya str., 244, Russia), professor

Valery Yu. Blumenstein, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), Dr. Sc. in Engineering, blumenstein.vu@gmail.com

Contribution of the authors:

Fyodor I. Panteleenko - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Vyacheslav A. Okovity - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Viktor A. Sidorov - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Vasily V. Okovity - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Valentin M. Astashinsky - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Switala Franciszek - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Valery Yu. Blumenstein - research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.