

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-15-20>

УДК 621.793.7:621.762

Исследование структуры и свойств многослойных плазменных порошковых покрытий из керамики и сплавов на основе никеля

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. А. Сидоров¹⁾, инж. В. В. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾,
докт. техн. наук, проф. В. М. Блюменштейн³⁾

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

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье рассмотрены проведенные исследования сформированных при оптимальных технологических режимах плазменных покрытий из порошковых композиций $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlYTa$. Они обладают приемлемой плотностью и имеют допустимое для эксплуатации количество поверхностных дефектов – пор и трещин. Крупногабаритные керамические частицы $Al_2O_3-TiO_2$ внедрены в $NiCrAlYTa$ матрицу при формировании покрытия. Такое строение связано с подвижностью у расплавленных жидкофазных составляющих $NiCrAlYTa$, которые стремятся заполнить промежутки и трещины, возникающие в процессе плазменного напыления металлооксидного покрытия и способствуют повышению плотности покрытий. В процессе высокотемпературного осаждения оксидная составляющая плавится в органическое целое с металлической в области границы раздела, элементы диффундируют и проникают друг в друга, поэтому граница раздела не является четко определенной, нет очевидных границ между слоистыми структурами, наравне с химическими и механическими связями присутствуют и металлургические связи. При установленных нами оптимальных параметрах напыления в системе покрытия наблюдается микрогетерогенная структура с содержанием элементов, обеспечивающих его износостойкость (орторомбическая фаза оксида титана, $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$, $\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$). Происходит растекание расплавленных порошковых частиц на подложке с минимальным разбрызгиванием и потерями при ударе о подложку. К основным кристаллическим фазам в системе сформированного покрытия можно отнести $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$, $\gamma-Al_2O_3$, анатаз (TiO_2) в дополнение к рутилу и $\alpha-Al_2O_3$. При анализе дифракционные пики у рутила выявляются в пределах $2\theta = 32^\circ$ и $2\theta = 70^\circ$, при этом содержание растёт после процесса распыления, что подтверждает переход из фазы анатаза в рутильную фазу при высокой температуре. На основании результатов количественного анализа установлено, что содержание в покрытии $\alpha-Al_2O_3$ и рутила TiO_2 составляет примерно 30,4 и 32,2 % соответственно, являясь при этом основными фазовыми структурами покрытий. Проведены исследования по влиянию дистанций процесса плазменного напыления на эксплуатационные характеристики износостойких плазменных покрытий – прочность сцепления, твердость и пористость.

Ключевые слова: процессы плазменного напыления, порошковые композиции, плазменное напыление на воздухе, металлические сплавы на основе никеля, оксидная керамика, эксплуатационные характеристики, морфология и структура

Для цитирования: Исследование структуры и свойств многослойных плазменных порошковых покрытий из керамики и сплавов на основе никеля / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 15–20. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-15-20>

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

Study of the Structure and Properties of Multilayer Plasma Powder Coatings of Ceramics and Nickel-Based Alloys

F. I. Panteleenko¹, V. A. Okovity¹, O. G. Devoino¹, V. A. Sidorov¹, V. V. Okovity¹,
V. M. Astashinsky², V. M. Blumenstein³

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

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

³Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev (Kemerovo, Russian Federation)

Abstract. The paper deals with the studies of plasma coatings formed under optimal technological conditions from $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlYTa}$ powder compositions. They have an acceptable density and have a number of surface defects acceptable for operation – pores and cracks. Large-dimensional ceramic $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ particles are embedded in the NiCrAlYTa matrix during the formation of the coating. This structure is associated with the mobility of the molten liquid-phase components of NiCrAlYTa, which tend to fill gaps and cracks that occur during plasma spraying of metal oxide coating and contribute to an increase in the density of coatings. In the process of high-temperature deposition, the oxide component melts into an organic whole with a metal one in the area of the interface, the elements diffuse and penetrate each other, so the interface is not clearly defined, there are no obvious boundaries between layered structures. These structures, along with chemical and mechanical bonds, also contain metallurgical bonds. With the optimal spraying parameters we have established, a microheterogeneous structure is observed in the coating system with the content of elements that ensure its wear resistance (orthorhombic phase of titanium oxide, $\text{Cr}_{1.12}\text{Ni}_{2.88}$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$). Spreading of molten powder particles on the substrate occurs with minimal spattering and losses upon impact on the substrate. The main crystalline phases in the system of the formed coating include $\text{Cr}_{1.12}\text{Ni}_{2.88}$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, anatase (TiO_2) in addition to rutile, and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. In the analysis, diffraction peaks in rutile are detected in the ranges $2\theta = 32^\circ$ and $2\theta = 70^\circ$, while the content increases after the sputtering process, which confirms the transition from the anatase phase to the rutile phase at high temperature. Based on the results of quantitative analysis, the content in coating of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and rutile TiO_2 is approximately 30.4 % and 32.2 %, respectively, being the main phase structures of the coatings. Studies have been carried out on the influence of distances of the plasma spraying process on the performance characteristics of wear-resistant plasma coatings – adhesion strength, hardness and porosity.

Keywords: plasma spraying processes, powder compositions, plasma spraying in air, nickel-based metal alloys, oxide ceramics, performance characteristics, morphology and structure

For citation: Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Blumenstein V. M. (2024) Study of the Structure and Properties of Multilayer Plasma Powder Coatings of Ceramics and Nickel-Based Alloys. *Science and Technique*. 23 (1), 15–20. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-15-20> (in Russian)

Введение

Проведенное нами исследование связано с аспектами технологий формирования защитных покрытий с применением оборудования для плазменного напыления на воздухе. Получаемые покрытия способны повышать износостойкость деталей, работающих в тяжелых условиях, с улучшением их эксплуатационных характеристик. В первую очередь, это относится к таким областям промышленности, как моторостроение, металлургическое оборудование, авиационная, космическая техника [1–7]. Ранее проведенные исследования для таких условий эксплуатации предлагают применять защитные газотермические покрытия на основе металлокерамических композиций [8–11] с последующей модификацией высокоэнергетическими источниками [12–14]. Одним из факто-

ров износостойкости является состав применяемых композиционных частиц исходных порошковых материалов, создающих необходимую структуру защитных покрытий. Оптимизация процессов напыления и последующей высокоэнергетической обработки обеспечивает увеличение прочностных характеристик благодаря уплотнению с созданием измельченных, неравновесных структур при сверхбыстром переохлаждении модифицированных слоев толщиной 50–150 мкм [15–18]. Для дальнейшего успешного внедрения металлокерамических покрытий требуется изучить различные аспекты разработки и создания композиционных покрытий; продолжить исследование и оптимизацию технологических факторов плазменного напыления для вновь разрабатываемых материалов и оборудования. В предлагаемой работе мы более внимательно отнеслись к во-

просам влияния на физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий получаемых структур на базе сплавов NiCrAlYTa и оксидов. Покрытия только на основе никелевых металлических сплавов не годятся для трибологических применений. Они обладают недостаточной твердостью, способствующей сильному износу в условиях повышенных нагрузок на этапах приработки при низких температурах. Следовательно, создание композитных защитных покрытий на основе никелевых сплавов и оксидной керамики – правильное решение для данной проблемы при сопоставлении стойкости металлов к окислению с химической стабильностью и твердостью оксидной керамики [19].

Структуры и свойства плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики и никелевых сплавов

Внешний вид защитного плазменного покрытия $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlYTa$ представлен на рис. 1а. Видно, что покрытию присуща хорошая плотность, отсутствие поверхностных дефектов – сколов, трещин. Керамические составляющие $Al_2O_3-TiO_2$ скреплены друг с другом и введены в расплавленные покрытия на базе никелевых сплавов. Такое строение структуры связано с подвижностью жидкофазных NiCrAlYTa компонентов, которые заполняют полости, поры и трещины, образующиеся в процессе плазменного напыления покрытия, и способно повысить плотность покрытия. На рис. 1б представлена структура композиционных металлокерамических плазменных покрытий. Керамическая фаза $Al_2O_3-TiO_2$ на структуре является темно-серой, а фаза металлического сплава на основе никеля – светло-серой. Сформированные покрытия представлены плотными и однородными структурами, заметны поры, качество межконтактных сцеплений достаточно хорошее, металлический сплав в покрытии находится в виде тонких продольных пластин. Сформированная структура получена в результате расплавленных частиц с вкраплениями переплавленных или нерасплавленных порошковых частиц. Пластинчатые микроструктуры подтверждают то, что распыленные в процессе нахождения в плазменной струе капли не затвердели до

удара о подложку и воздействуют на нее или ранее сформированные слои с достаточно высокими скоростями. Уровень плавления порошковых частиц в дальнейшем непосредственно определяет эксплуатационные свойства – пористость, адгезию и твердость. Видно, что граница подложка – покрытие не является строго определенной, что подтверждает версию о том, что в процессе осаждения керамическая составляющая плавится в области границы раздела с металлической в органическое целое, элементы диффундируют, проникая друг в друга без заметных границ между слоями. В покрытии присутствуют металлургические связи, кроме химических и механических, к основным кристаллическим фазам можно отнести в сформированной системе α - и γ - Al_2O_3 , анатаз (TiO_2), фазу $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$, рутил TiO_2 . Дифракционные пики у рутила TiO_2 в промежутках $2\theta = 32^\circ$ и $2\theta = 70^\circ$, содержание растет после нанесения, что подтверждает переход при высокой температуре анатаза в рутильную фазу. Количественный анализ показал, что α - Al_2O_3 и анатаз TiO_2 – основные фазовые структуры высокотемпературных керамических покрытий с содержанием 30,4 и 32,2 % соответственно. Толщины у сформированных слоев износостойкого покрытия примерно 300 мкм. Элементный анализ подтвердил присутствие в нем алюминия, тантала, никеля, кислорода, иттрия с равномерным распределением вдоль всей толщины сформированного слоя. Оказываемое воздействие дистанции напыления на эксплуатационные характеристики у плазменных покрытий, сформированных на оптимальных режимах нанесения, показано на рис. 2.

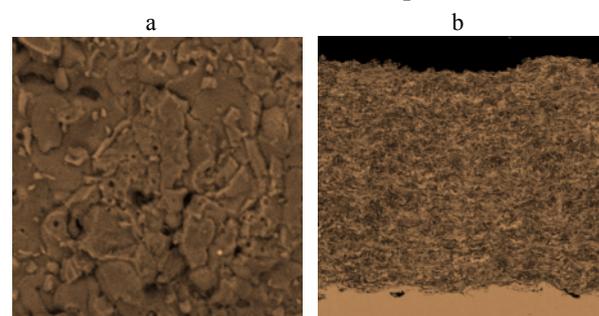


Рис. 1. Поверхность сформированного износостойкого покрытия (а) и его микроструктура (б) из порошкового материала $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlYTa$ ($\times 200$)

Fig. 1. Surface of the formed wear-resistant coating (a) and its microstructure (b) from $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlYTa$ powder material at ($\times 200$)

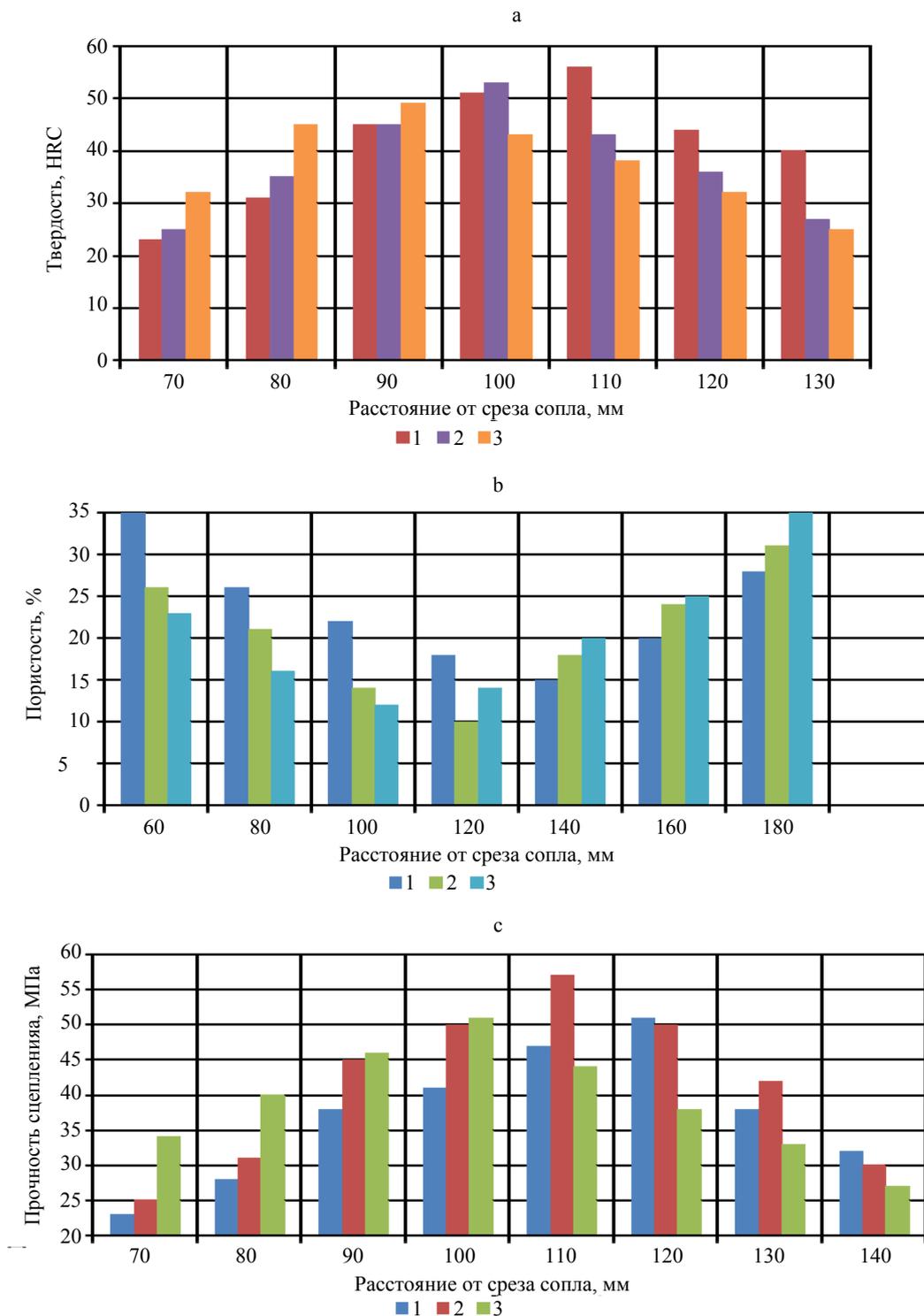


Рис. 2. Влияние на технологические характеристики композиционного металлокерамического покрытия $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlYTa$ дистанции напыления L , мм: 1 – 70 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 30 % $Ni-Cr-Al-Y-Ta$; 2 – 60 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 40 % $Ni-Cr-Al-Y-Ta$; 3 – 50 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 50 % $Ni-Cr-Al-Y-Ta$; фракция 40...63 мкм, $I = 500$ А, $R_N = 45$ л/мин, $R_{пор} = 4,5$ кг/ч); а – твердость (HRC); б – пористость, %; в – прочность сцепления

Fig. 2. Influence on the technological characteristics of the composite cermet coating $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlYTa$ of the deposition distance L , mm (1 – 70 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 30 % $Ni-Cr-Al-Y-Ta$; 2 – 60 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 40 % $Ni-Cr-Al-Y-Ta$; 3 – 50 % $Al_2O_3-TiO_2$ – 50 % $Ni-Cr-Al-Y-Ta$, fraction 40...63 μm , $I = 500$ A, $R_N = 45$ l/min, $R_{por} = 4.5$ kg/h); а – hardness (HRC); б – porosity, %; в – adhesion strength

ВЫВОДЫ

1. Исследованы полученные при оптимизированных режимах плазменного напыления структуры и свойства порошковых покрытий из $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlYTa}$. Они обладают хорошей плотностью и минимальным количеством поверхностных дефектов. Керамические составляющие $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ внедрены в мягкую матрицу металлического сплава на базе никеля. Это определяется подвижностью расплавленных жидкофазных NiCrAlYTa составляющих, способных заполнять полости и трещины, улучшая плотность покрытия. Граница раздела в покрытии ярко не выражена, керамические составляющие покрытия переплавляются в органическое целое с металлической с диффузированием и проникновением друг в друга, не создавая видимых границ между слоями.

2. У напыленного покрытия создается микрогетерогенная структура с содержанием элементов ($\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, α - и γ - Al_2O_3 , орторомбическая фаза оксида титана), обеспечивающих износостойкость. Дифракционные пики рутила TiO_2 находятся в пределах $2\theta = 32^\circ$ и $2\theta = 70^\circ$, с увеличением после нанесения, подтверждая переход из фазы анатаза в рутильную фазу. Содержание α - Al_2O_3 и рутила TiO_2 – 30,4 и 32,2 % соответственно. Рассмотрено влияние параметров дистанции нанесения на твердость, пористость и прочность сцепления металлокерамических покрытий.

3. На оптимизированных режимах значения эксплуатационных характеристик следующие: прочность сцепления – 52–57 МПа; твердость – 52–56 HRC; пористость – 7–9 %; износ покрытия (трение со смазкой) – 4,1–4,6 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

- Microwave Dielectric Properties of Low-energy Plasma-Coated $\text{NiCrAlY / Al}_2\text{O}_3$ Composite / Liang Zhou [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 210. P. 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.002>.
- Bowler, N. Designing Dielectric Loss at Microwave Frequencies Using Multi-Layered Filler Particles in a Composite / N. Bowler // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2006. Vol. 13, No 4. P. 703–711. <https://doi.org/10.1109/tdei.2006.1667727>.
- Tribology of $\text{NiCrAlY+Al}_2\text{O}_3$ Composite Coatings by Plasma Spraying with Hybrid Feeding of Dry Powder+Suspension / G. Bolelli [et al.] // *Wear*. 2015. Vol. 344–345. P. 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.014>.
- Tolpygo, V. K. Surface Rumpling of a (Ni, Pt) Al Bond Coat Induced by Cyclic Oxidation / V. K. Tolpygo, D. R. Clarke // *Acta Mater*. 2000. Vol. 48, No 13. P. 3283–3293. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(00\)00156-7](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(00)00156-7).
- Hybrid Intermetallic Ru/Pt-Modified Bond Coatings for Thermal Barrier Systems / B. Tryon [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 202, No 2. P. 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.086>.
- Oxidation Resistance of a Zr-Doped NiAl Coating Thermally Deposited on a Nickel-Based Super Alloy / S. Hamadi [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 204, No 6–7. P. 756–760. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.073>.
- Influence of Substrate Material on Oxidation Behavior and Cyclic Lifetime of EB-PVD TBC Systems / U. Schulz [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 146–147. P. 117–123. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01481-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01481-5).
- Gao, J. G. Fabrication and High Temperature Oxidation Resistance of $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Micro Laminated Coatings on Stainless steel / J. G. Gao, Y. D. He, D. R. Wang // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 123, No 2–3. P. 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.05.047>.
- Sathish, S. Comparative Study on Corrosion Behavior of Plasma Sprayed Al_2O_3 , ZrO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$, $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Coatings / S. Sathish, M. Geetha // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26, No 5. P. 1336–1344. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(16\)64236-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(16)64236-x).
- A protective Ceramic Coating to Improve Oxidation and Thermal Shock Resistance on CrMn Alloy at Elevated Temperatures / X. Shan [et al.] // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41, No 3, Part B. P. 4706–4713. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.019>.
- Microstructural Investigations of $\text{NiCrAlY + Y}_2\text{O}_3$ Stabilized ZrO_2 Cermet Coatings Deposited by Plasma Transferred Arc (PTA) / C. Demian [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 300. P. 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.046>.
- Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of HVOF Sprayed NiCrAlY Coatings Without and with Nano Ceriat / X. Sun [et al.] // *Journal of Thermal Spraying Technology*. 2012. Vol. 21. P. 818–824. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9760-3>.
- Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных плазменных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364>.
- 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.
- Многослойные композиционные плазменные оксидных покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 422–431. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-431>.
- Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой NiCr и твердый ZrO_2) / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28>.
- Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474>.
- Разработка композиционного материала на основе керамики с применением добавок соединений туго-

плавких металлов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 4 (140). С. 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24>.

19. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методами плазменного напыления на воздухе / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 5. С. 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374>.

Поступила 10.01.2023

Подписана к печати 14.03.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

- Zhou L., Zhou W., Luo F., Su J., Zhu D., Dong Y. (2015) Microwave Dielectric Properties of Low-energy Plasma-Coated NiCrAlY / Al₂O₃ Composite. *Surface and Coatings Technology*, 210, 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.002>
- Bowler N. (2006) Designing Dielectric Loss at Microwave Frequencies Using Multi-Layered Filler Particles in a Composite. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13 (4), 703–711. <https://doi.org/10.1109/tdei.2006.1667727>.
- Bolelli G., Candeli A., Lusvardi L., Ravoux A., Cazes K., Denoirjean A., Valette S., Chazelas C., Meillot E., Bianchi L. (2015) Tribology of NiCrAlY+Al₂O₃ Composite Coatings by Plasma Spraying with Hybrid Feeding of Dry Powder+Suspension. *Wear*, 344–345, 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.014>.
- Tolpygo V. K., Clarke D. R. (2000) Surface Rumpling of a (Ni, Pt) Al Bond Coat Induced by Cyclic Oxidation. *Acta Materialia*, 48 (3), 3283–3293. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(00\)00156-7](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(00)00156-7).
- Tryon B., Murphy K. S., Yang J. Y., Levi C. G., Pollock T. M. (2012) Hybrid Intermetallic Ru/Pt-Modified bond Coatings for Thermal Barrier Systems. *Surface and Coatings Technology*, 202 (2), 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.086>.
- Hamadi S., Bacos M.-P., Poulain M., Seyeux A., Maurice V., Marcus P. (2013) Oxidation Resistance of a Zr-Doped NiAl Coating Thermally Deposited on a Nickel-Based Super Alloy. *Surface and Coatings Technology*, 204 (6–7), 756–760. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.073>.
- Schulz U., Menzebach M., Leyens C., Q Yang Y. (2001) Influence of Substrate Material on Oxidation Behavior and Cyclic Lifetime of EB-PVD TBC Systems. *Surface and Coatings Technology*, 146-147, 117–123. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01481-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01481-5)
- Gao J. G., He Y. D., Wang D. R. (2010) Fabrication and High Temperature Oxidation Resistance of ZrO₂/Al₂O₃ Micro Laminated Coatings on Stainless Steel. *Materials Chemistry and Physics*, 123 (2–3), 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.05.047>.
- Sathish S., Geetha M. (2016) Comparative Study on Corrosion Behavior of Plasma Sprayed Al₂O₃, ZrO₂, Al₂O₃/ZrO₂, ZrO₂/Al₂O₃ Coatings. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 26 (5), 1336–1344. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(16\)64236-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(16)64236-x).
- Shan X., Wei L. Q., Zhang X. M., Li W. H., Tang W. X., Liu Y., Tong J., Ye S. F., Chen Y. F. (2015) A Protective Ceramic Coating to Improve Oxidation and Thermal Shock Resistance on CrMn Alloy at Elevated Temperatures. *Ceramics International*, 41 (3, Part B), 4706–4713. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.019>.
- Demian C., Denoirjean A., Pawłowski L., Denoirjean P., El Ouardi R. (2016) Microstructural investigations of NiCrAlY + Y₂O₃ stabilized ZrO₂ Cermet Coatings Deposited by Plasma Transferred arc (PTA). *Surface and Coatings Technology*, 300, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.046>.
- Sun X., Chen S., Wang Y., Pan Z., Wang L. (2012) Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of HVOF Sprayed NiCrAlY Coatings Without and with Nano Ceria. *Journal of Thermal Spraying Technology*, 21, 818–824. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9760-3>.
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. (2016) Formation and Research of multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteroid Protection. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 15 (5), 357–364. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364> (in Russian).
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko E. F. (2017) Investigation Of Plasma Two-Layer Composite Zirconium dioxide – Nichrome Coatings. *Aktualnye Problemy v Mashinostroenii* [Actual Problems in Mechanical Engineering], 4 (3), 100–105 (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2017) Multilayer Composite Plasma Coatings on Screen Protection Elements Based on Zirconium Dioxide. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (5), 422–431. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-431> (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2018) Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO₂ Layer). *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 17 (1), 21–28. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28> (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2020) Formation of Plasma Powder Coatings from Cermet with Subsequent High-Energy Modification. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 19 (6), 469–474. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-469-474> (in Russian).
- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Rafal K. (2020) Development of Composite Material Based on Ceramics with the use of Additives of Refractory Metal Compounds. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, (4), 18–24. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-4-18-24> (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2021) Optimization of Coating Process from Cermet Powders by Plasma Spraying in Air. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (5), 369–374. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-369-374> (in Russian).

Received: 10.01.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 31.01.2024