

Научная статья

УДК 621.793.79

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-06](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-06)

Структура электровзрывного покрытия системы TiB_2 -Ni-Ag

Василий Витальевич Почетуха¹, Денис Анатольевич Романов²,
Екатерина Степановна Ващук³, Виктор Евгеньевич Громов⁴

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, v.pochetuha@mail.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, romanov_da@physics.sibsiu.ru

³Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия; Филиал Кузбасского государственного университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия, vaschuk@bk.ru

⁴Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru

Original article

Structure of Electroexplosive Coating of the TiB_2 -Ni-Ag System

Vasily V. Pochetukha¹, Denis A. Romanov², Ekaterina S. Vashchuk³,
Victor Ye. Gromov⁴

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, v.pochetuha@mail.ru

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, romanov_da@physics.sibsiu.ru

³Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia; Prokopyevsk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk, Russia, vaschuk@bk.ru

⁴Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru

Аннотация. Покрытие системы TiB_2 -Ni-Ag получено на подложке медного электрического контакта за счет одновременного электрического взрыва серебряной и никелевой фольги, а также расположенным на поверхности фольг порошком TiB_2 . Исследования структуры проведены с использованием метода сканирующей электронной микроскопии, также исследована переходная область между покрытием и медной подложкой. Покрытие имеет среднюю толщину 160 мкм и характеризуется структурой с включениями TiB_2 микрокристаллического и нанокристаллического размера, расположенными в матрице на основе серебра и никеля. На границе между покрытием и медной подложкой присутствуют периодические волнообразные структуры с микрометровым размером волн, образовавшиеся в результате гидродинамических неустойчивостей в процессе нанесения покрытия. В переходной области между покрытием и подложкой нанокристаллическая структура покрытия также представляет собой наноразмерные частицы,

Abstract. The coating of the TiB_2 -Ni-Ag system is obtained on a substrate of a copper electrical contact by simultaneous electrical explosion of silver and nickel foils along with the TiB_2 powder located on the surface of the foils. The structure and the transition area between the coating and the copper substrate are investigated using scanning electron microscopy. The coating has an average thickness of 160 μm and is characterized by a structure with microcrystalline and nanocrystalline TiB_2 inclusions located in a silver- and nickel-based matrix. There are periodic wave-like structures with micrometer-sized waves at the boundary between the coating and the copper substrate formed as a result of hydrodynamic instabilities during the coating process. The nanocrystalline structure of the coating at the transition area between the coating and the substrate presents nanosized particles of solid copper, silver, and nickel solutions. There are cracks in the copper substrate; they formed by the impact of the shock-compressed layer and extend along the intergranular boundaries.

представленные твердыми растворами на основе меди, серебра и никеля. В медной подложке от границы раздела с покрытием проходят трещины по межзеренным границам, сформированные в результате воздействия ударно-сжатого слоя.

Ключевые слова: композиционное покрытие, электровзрывное напыление, микроструктура, наноструктура, диборид титана, никель, серебро, медная подложка, фаза, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия

Для цитирования: Почетука В.В., Романов Д.А., Ващук Е.С., Громов В.Е. Структура электровзрывного покрытия системы TiB₂-Ni-Ag // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1 (147). С. 50–55. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-06](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-06).

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>.

Введение

Электрические контакты являются важными компонентами переключателей электрических цепей и позволяют току проходить через контакт между двумя проводниками. Электрические контакты отвечают за соединение, проведение и прерывание нормального тока и тока повреждения. Их качество и срок службы напрямую связаны с таковыми характеристиками конкретного коммутирующего устройства определенной электрической цепи. Электрические контакты в основном используются в реле, контакторах, воздушных выключателях, токоограничивающих выключателях, устройствах защиты двигателей, микровыключателях, инструментах защиты, компьютерных клавиатурах, портативных машинах, бытовой технике, автомобильной технике (стеклоподъемники, зеркала заднего вида, выключатели света, стартеров двигателей и других выключателях нагрузки), выключатели защиты от утечки [1] и т.д. Существует множество материалов для изготовления электрических контактов, в основном для дугостойких электрических контактов используют серебро, сереброникель [2], серебро — оксид меди, серебро — оксид кадмия, серебро — оксид олова, серебро — оксид олова и оксид индия, серебро — оксид цинка [3], красную медь, латунь, фосфористую медь, бронзу, оловянную медь, бериллиевую медь [4], медно-никелевые сплавы, цинк-никелевую медь, нержавеющую сталь [5] и т.д. Однако современные металлические контакты имеют такие проблемы, как стойкость к химической коррозии, неудовлетворительная стойкость к дуговой абляции и высокие производственные затраты, что ограничивает их применение [6]. В атмосфере коммутационные компоненты часто генери-

Keywords: composite coating, electroexplosive coating, microstructure, nanostructure, titanium diboride, nickel, silver, copper substrate, phase, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy

For citation: Pochetukha V.V., Romanov D.A., Vashchuk E.S., Gromov V.E. Structure of Electroexplosive Coating of the TiB₂-Ni-Ag System. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 1 (147). P. 50–55. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-06](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-06).

Funding: research is funded by the Russian Science Foundation grant No 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>.

руют искры или дуги при подключении или разрыве цепи. Возникновение электрической дуги при коммутации электрических контактов неизбежно приводит к окислению и абляции контактов, а также может привести к карбонизации органических веществ в воздухе с образованием отложений углерода, что постепенно увеличит контактное сопротивление переключателя или может привести к размыканию цепи. Главные контакты низковольтных контакторов обычно изготавливаются из сплава серебра с никелем или сплава на основе оксидов серебра и олова, при этом содержание серебра составляет более 90 %, а остальное составляет оксид никеля или олова [7]. Серебро обладает хорошей электропроводностью, что позволяет обеспечить низкое контактное сопротивление и предотвратить перегрев контактов, а оксиды никеля или олова обладают хорошей стойкостью к дуговой абляции, что увеличивает срок службы главных контактов контактора.

Описанные выше электроконтактные материалы получают объемными методами, такими как:

1. Жидкофазные методы получения металломатричных композиционных материалов:

— метод механического замешивания упрочняющих частиц в расплав [8];

— метод пропитки [9];

— твердофазные методы получения металломатричных композиционных материалов [10].

2. Твердофазные методы получения металломатричных композиционных материалов:

— механическая обработка порошков в высокоэнергетических шаровых мельницах [11];

— методы спекания металломатричных композиционных материалов [12];

— методы порошковой металлургии [13].

Методы получения композиционных дугостойких покрытий на контактах переключателей мощных электрических сетей включают:

- методы наплавки [14];
- методы напыления (газопламенное [15], плазменное [16], детонационное [17], высокоскоростное газопламенное [18], холодное газодинамическое [19] и электровзрывное [20]).

Из приведенного выше обзора литературы вытекает существующая научная проблема повышения срока службы материалов электрических контактов. Частным случаем решения данной проблемы является создание материалов электрических контактов за счет формирования новой структуры и фазового состава, либо за счет формирования на поверхности электрических контактов дугостойких покрытий.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры электроэрозсионностойкого композиционного покрытия системы TiB_2 -Ni-Ag, полученного методом электровзрывного напыления.

Материал и методы исследования

Покрытия напыляли на образцы электротехнической меди марки M00 (химический состав, масс. %: Cu 99,99; Fe 0,001; Ni 0,001; S 0,001; P 0,001; As 0,001; Pb 0,001; Zn 0,001; Ag 0,001; O 0,0005; Sb 0,0005;

Bi 0,0005; Sn 0,0005), имеющие форму параллелепипеда с размерами 25x25x5 мм. Электровзрывное напыление проводили с использованием серебряной фольги (химический состав, масс. %: Ag 99,9; Pb 0,003; Fe 0,035; Sb 0,002; Bi 0,002; Cu 0,058) массой 400 мг и никелевой фольги (химический состав, масс. %: Ni 99,99; Co 0,004; Al 0,0006; Bi 0,0001; Fe 0,002; Cd 0,0003; Si 0,001; Mg 0,001; Mn 0,001) массой 20 мг. На поверхности фольг размещали порошок диборида титана TiB_2 (дисперсность частиц 1–5 мкм) массой 200 мг. Процесс осуществляли при времени воздействия плазмы на поверхность образца ~100 мкс и поглощаемой плотности мощности на оси струи ~5,5 ГВт/м². Электровзрывное напыление покрытий проводили на электровзрывной установке EESM (Electrical explosive spraying machine), СибГИУ (г. Новокузнецк).

Анализ и определение микроструктуры покрытий, распределение элементов производили с помощью сканирующего электронного микроскопа KYKY-EM 6900 (произведен в Китае).

Результаты и их обсуждение

Структура покрытий системы TiB_2 -Ni-Ag после электровзрывного нанесения представлена серебряной матрицей с включениями упрочняющей фазы, состоящими из TiB_2 и Ni (рис. 1).

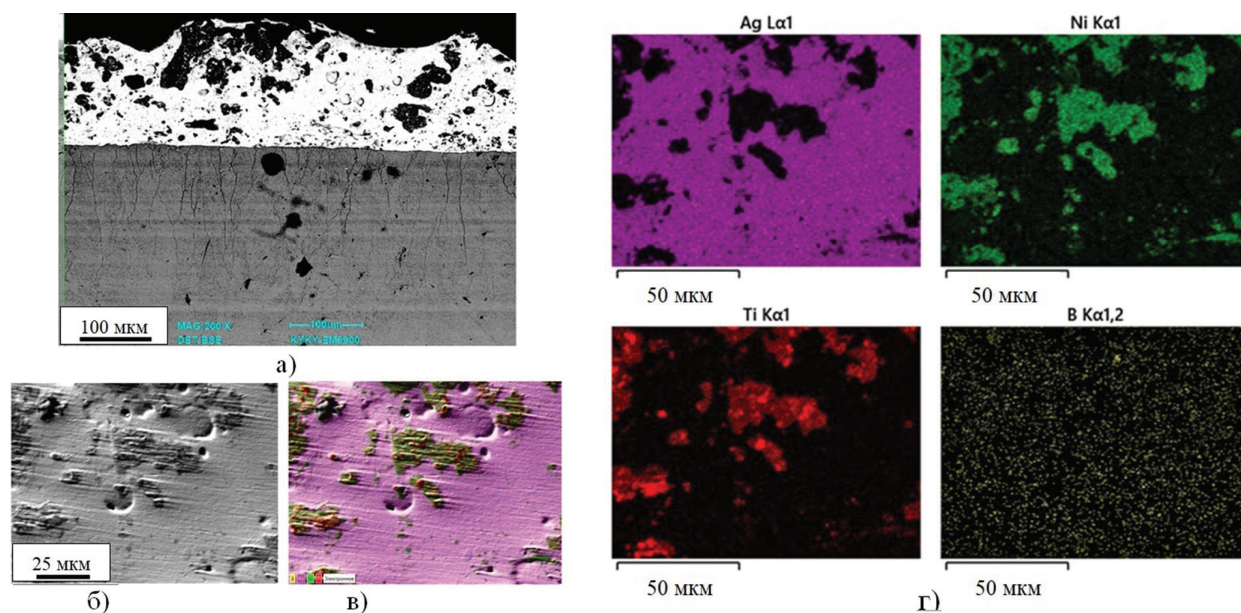


Рис. 1. СЭМ изображения структуры покрытия системы TiB_2 -Ni-Ag, нанесенного электровзрывным методом, и медной подложки (а), серебряная матрица с включениями TiB_2 -Ni (б) и карты распределения атомов Ag, Ti, B и Ni, полученные с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (в, г)

Средняя толщина покрытий составляет 160 мкм. Их поверхность имеет развитый рельеф, сформированный в результате течений расплава и гидродинамических неустойчивостей. На границе между покрытием и медной подложкой присутствуют пе-

риодические волнообразные структуры с микрометровым размером волн, образовавшиеся в результате гидродинамических неустойчивостей в процессе нанесения покрытия. В переходной области между покрытием и подложкой нанокристаллическая

структура покрытия также образует наноразмерные частицы, представленные твердыми растворами на основе меди, серебра и никеля.

Упрочняющая фаза представлена двумя типами включений. Крупные включения имеют вытянутую форму. Их средняя длина составляет 43 мкм. Стоит отметить, что самые крупные элементы могут достигать в длину 100 мкм. Их структура представлена матрицей из никеля с малыми вкраплениями серебра, в которую вплавлены частицы порошка TiB_2 . Крупные

включения располагаются в большей степени в верхней и средней частях покрытия. Малые включения, со средним размером 8 мкм, смещены ближе к границе с подложкой. Элементный анализ показал, что подобные включения состоят из частиц порошка TiB_2 , вокруг которых сформирован тонкий слой никеля.

В медной подложке от границы раздела с покрытием проходят трещины по межзеренным границам, сформированные в результате воздействия ударно-сжатого слоя.

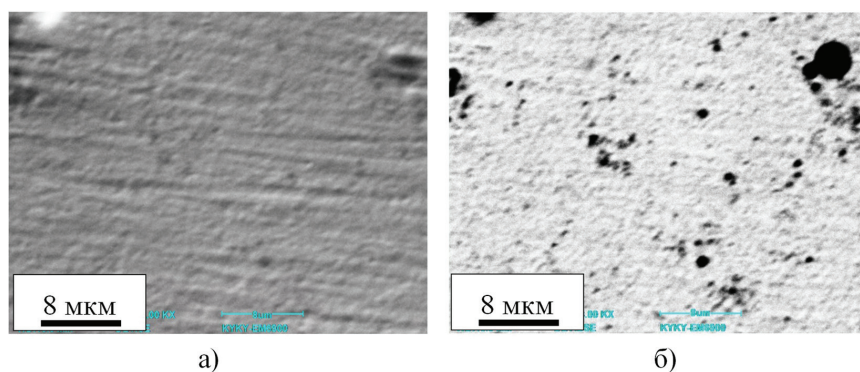


Рис. 2. СЭМ изображения микроstructures матрицы системы TiB_2 -Ni-Ag, полученного электровзрывным методом: а) SE режим сканирования; б) BSE режим сканирования

Микроstructure серебряно-никелевой матрицы показана на рисунке 2. В ней наблюдается множество частиц диборида титана со средним размером 0,36 мкм, образовавшихся в результате неравновесных условий кристаллизации. В областях с пониженной растворимостью газа и скоростью охлаждения некоторые частицы консолидировались в более крупные с размером ~ 2 мкм.

Заключение

Впервые методом электровзрывного напыления получено композиционное покрытие системы TiB_2 -Ni-Ag и исследована его структура на микро- и наноуровне. Покрытие имеет среднюю толщину 160 мкм и характеризуется микроstructure, представляющей серебряную матрицу с включениями

упрочняющих фаз, состоящих из диборида титана и никеля. Нанокристаллическая структура покрытия представляет собой твердые растворы на основе меди, никеля и серебра, в которых располагаются наноразмерные частицы диборида титана. В переходной области между покрытием и подложкой нанокристаллическая структура покрытия также состоит из наноразмерных частиц, представленных твердыми растворами на основе меди, серебра и никеля. В целом сформированная структура с включениями диборида титана микрокристаллического и нанокристаллического размера, расположенными в матрице на основе серебра и никеля, позволяет предположить высокие механические свойства и высокую электроэрозионную стойкость сформированных покрытий.

Библиографический список

1. Braunovic M., Myshkin N.K., Konchits V.V. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2007. 672 p. <https://doi.org/10.1201/9780849391088>
2. Buggy M., Conlon C. Material Selection in the Design of Electrical Con-NECTORS // Journal of Materials Processing Technology. 2024. Vol. 153–154. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.209>
3. Kloch K.T., Kozak P., Mlyniec A. A Review and Perspectives on Predicting the Performance and Durability of Electrical Contacts in Automotive Applications // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 121. P. 105143. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105143>
4. Trinh K.E., Tsipenyuk A., Varenberg M., et al. Wear Debris and Electrical Resistance in Textured Sn-Coated Cu Contacts Subjected to Fretting // Wear. 2015. Vol. 344–345. P. 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.010>

5. Cruz-Cruz I., Hernández-Maya R., Reséndiz-Hernández J.E., et al. Copper-Nickel/SiC Composites for Applications on Contact Electrodes // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. P. e39965. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39965>
6. Song J., Yuan H., Schinow V. Fretting Corrosion Behavior of Electrical Contacts With Tin Coating in Atmosphere and Vacuum // *Wear*. 2019. Vol. 426–427. P. 1439–1445. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.024>
7. Kumar S.P., Parameshwaran R., Kumar S.A., et al. Electrical and Mechanical Studies on Pure-Silver Coated Aluminium Based Electrical Contact Materials // *Heenalisha*. 2020. Vol. 33. P. 3621–3625. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.666>
8. Suryanarayana C. Mechanical Alloying: a Critical Review // *Materials Research Letters*. 2022. Vol. 10. P. 619–647. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2075243>
9. Ramanathan A. A Review on the Production of Metal Matrix Composites Through Stir Casting–Furnace Design, Properties, Challenges, and Research Opportunities // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 42. P. 213–245. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.017>
10. Suryanarayana C. Mechanical Alloying and Milling // *Progress in Materials Science*. 2001. Vol. 46. P. 1–184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
11. Suryanarayana C. Mechanical Alloying: a Critical Review // *Materials Research Letters*. 2022. Vol. 10. P. 619–647. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2075243>
12. Mukhopadhyay A., Basu B. Consolidation–Microstructure–Property Relations in Bulk Nanoceramics and Ceramic Nanocomposites: a Review // *International Materials Reviews*. 2007. Vol. 52. P. 257–288. <https://doi.org/10.1179/174328007X160281>
13. Eessaa A.K., Elkady O.A., El-Shamy A.M. Powder Metallurgy as a Perfect Technique for Preparation of Cu-TiO₂ Composite by Identifying Their Microstructure and Optical Properties // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 7034. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33999-y>
14. Zhu L., Xue P., Lan Q., et al. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review // *Optics & Laser Technology*. 2021. Vol. 138. P. 106915. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915>
15. Davis J.R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. Ohio: ASM International, 2004. 344 p.
16. Vuoristo P. *Thermal Spray Coating Processes*. Amsterdam: Elsevier, 2014. P. 229–276.
17. Bataev I.A., Riabinkina P.A., Emurlaev K.I., et al. Uncovering the Influence of Mechanical Properties on Wave Formation During High-Velocity Impact Welding by Numerical Simulation // *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. Vol. 332. P. 18532. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118532>
18. Shtertser A.A., Batraev I.S., Uliantsev V.Yu., et al. Detonation Spraying of Ti-Cu Mixtures in Different Atmospheres: Carbon, Nitrogen and Oxygen Uptake by the Powders // *Surfaces and Interfaces*. 2020. Vol. 21. P. 100676. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100676>
19. Raoelison R.N., Xie Y., Sapanathan T., et al. Cold Gas Dynamic Spray Technology: A Comprehensive Review of Processing Conditions for Various Technological Developments Till to Date // *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 19. P. 134–159. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.001>
20. Filyakov A.D., Pochetukha V.V., Romanov D.A., et al. Influence of Electron Beam Treatment on Structure and Phase Composition of TiB₂-Ag Coating Deposited by Electrical Explosion Spraying // *Coatings*. 2023. Vol. 13 (11). P. 1867. <https://doi.org/10.3390/coatings13111867>

References

1. Braunovic M., Myshkin N.K., Konchits V.V. *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. Boca Raton: CRC Press, 2007. 672 p. <https://doi.org/10.1201/9780849391088>
2. Buggy M., Conlon C. Material Selection in the Design of Electrical Connectors. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. Vol. 153–154. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.209>
3. Kloch K.T., Kozak P., Mlyniec A. A Review and Perspectives on Predicting the Performance and Durability of Electrical Contacts in Automotive Applications. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 121. P. 105143. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105143>
4. Trinh K.E., Tsipenyuk A., Varenberg M., et al. Wear Debris and Electrical Resistance in Textured Sn-Coated Cu Contacts Subjected to Fretting. *Wear*. 2015. Vol. 344–345. P. 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.010>
5. Cruz-Cruz I., Hernández-Maya R., Reséndiz-Hernández J.E., et al. Copper-Nickel/SiC Composites for Applications on Contact Electrodes. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. P. e39965. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39965>
6. Song J., Yuan H., Schinow V. Fretting Corrosion Behavior of Electrical Contacts With Tin Coating in Atmosphere and Vacuum. *Wear*. 2019. Vol. 426–427. P. 1439–1445. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.024>
7. Kumar S.P., Parameshwaran R., Kumar S.A., et al. Electrical and Mechanical Studies on Pure-Silver Coated Aluminium Based Electrical Contact Materials. *Heenalisha*. 2020. Vol. 33. P. 3621–3625. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.666>
8. Suryanarayana C. Mechanical Alloying: A Critical Review. *Materials Research Letters*. 2022. Vol. 10. P. 619–647. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2075243>
9. Ramanathan A. A Review on the Production of Metal Matrix Composites Through Stir Casting–Furnace Design, Properties, Challenges, and Research Opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 42. P. 213–245. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.017>

10. Suryanarayana C. Mechanical Alloying and Milling. *Progress in Materials Science*. 2001. Vol. 46. P. 1–184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
11. Suryanarayana C. Mechanical Alloying: A Critical Review. *Materials Research Letters*. 2022. Vol. 10. P. 619–647. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2075243>
12. Mukhopadhyay A., Basu B. Consolidation–Microstructure–Property Relation-Ships in Bulk Nanoceramics and Ceramic Nanocomposites: A Review. *International Materials Reviews*. 2007. Vol. 52. P. 257–288. <https://doi.org/10.1179/174328007X160281>
13. Eessaa A.K., Elkady O.A., El-Shamy A.M. Powder Metallurgy as a Perfect Technique for Preparation of Cu-TiO₂ Composite by Identifying Their Microstructure and Optical Properties. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 7034. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33999-y>
14. Zhu L., Xue P., Lan Q., et al. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review. *Optics & Laser Technology*. 2021. Vol. 138. P. 106915. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915>
15. Davis J.R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. Ohio: ASM International, 2004. 344 p.
16. Vuoristo P. *Thermal Spray Coating Processes*. Amsterdam: Elsevier, 2014. P. 229–276.
17. Bataev I.A., Riabinkina P.A., Emurlaev K.I., et al. Uncovering the Influence of Mechanical Properties on Wave Formation During High-Velocity Impact Welding by Numerical Simulation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. Vol. 332. P. 18532. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118532>
18. Shtertser A.A., Batraev I.S., Ulianitsky V.Yu., et al. Detonation Spraying of Ti-Cu Mixtures in Different Atmospheres: Carbon, Nitrogen and Oxygen Uptake by the Powders. *Surfaces and Interfaces*. 2020. Vol. 21. P. 100676. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100676>
19. Raoelison R.N., Xie Y., Sapanathan T., et al. Cold Gas Dynamic Spray Technology: A Comprehensive Review of Processing Conditions for Various Technological Developments Till to Date. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 19. P. 134–159. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.001>
20. Filyakov A.D., Pochetukha V.V., Romanov D.A., et al. Influence of Electron Beam Treatment on Structure and Phase Composition of TiB₂–Ag Coating Deposited by Electrical Explosion Spraying. *Coatings*. 2023. Vol. 13 (11). P. 1867. <https://doi.org/10.3390/coatings13111867>

Информация об авторах

В.В. Почегуха, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

Д.А. Романов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

Е.С. Ващук, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия; доцент кафедры естественно-научных и экономических дисциплин, Филиал Кузбасского государственного университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия;

В.Е. Громов, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой естественно-научных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

Information about the authors

V.V. Pochetukha, Candidate of Sciences in Technology, Senior Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

D.A. Romanov, Doctor of Sciences in Technology, Leading Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

E.S. Vashchuk, Candidate of Sciences in Technology, Senior Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia; Associate Professor, Department of Natural Sciences and Economics, Prokopyevsk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk, Russia;

V.E. Gromov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Head of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.