

Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 4 (150). С. 35–42.

Izvestiya of Altai State University. 2026. No 4 (150). P. 35–42.

Научная статья

УДК 621.793.79

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-04](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-04)

Тонкая структура электровзрывного покрытия из диборида титана, никеля и серебра

*Василий Витальевич Почету́ха¹, Денис Анатольевич Романов²,
Екатерина Степановна Денисенко³, Виктор Евгеньевич Громов⁴*

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

²Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Новокузнецке, Новокузнецк, Россия, da_rom@live.ru

³Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия, vaschuk@bk.ru

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

Original article

Fine Structure of an Electroexplosive Coating Consisting of Titanium Diboride, Nickel and Silver

*Vasiliy V. Pochetukha¹, Denis A. Romanov², Ekaterina S. Denisenko³,
Victor Ye. Gromov⁴*

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

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Novokuznetsk Branch, Novokuznetsk, Russia, da_rom@live.ru

³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch, Prokopyevsk, Russia, vaschuk@bk.ru

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

Аннотация. Настоящая статья посвящена исследованию композиционного покрытия системы TiB_2 -Ni-Ag, полученного на подложке медного электрического контакта за счет одновременного электрического взрыва серебряной и никелевой фольги, а также расположенным на поверхности фольг порошком TiB_2 . Исследования тонкой структуры проведены с использованием метода просвечивающей электронной микроскопии; также исследована переходная область между покрытием и медной подложкой. Нанокристаллическая структура покрытия представляет собой твердые растворы на основе меди, никеля и серебра, в которых располагаются наноразмерные частицы TiB_2 . Локально установлена начальная стадия распада твердых растворов при образовании каких-либо других фаз. В переходной области между покрытием и подложкой нанокристаллическая структура покрытия также представляет собой

Abstract. This article is devoted to the study of a composite coating of the TiB_2 -Ni-Ag system obtained on a copper electrical contact substrate by simultaneous electrical explosion of silver and nickel foils and TiB_2 powder located on the surface of the foils. Fine structure studies are carried out using transmission electron microscopy; the transition region between the coating and the copper substrate is also investigated. The nanocrystalline structure of the coating is solid solutions based on copper, nickel and silver, in which nanosized TiB_2 particles are located. The initial stage of solid solutions decomposition during the formation of any other phases is locally identified. The nanocrystalline structure of the coating in the transition region between the coating and the substrate is also represented by solid solutions based on copper, silver, and nickel. Also, titanium, which was formed after partial decomposition of the TiB_2 phase

наноразмерные частицы, представленные твердыми растворами на основе меди, серебра и никеля. Также титан, который образовался после частичного распада фазы TiB_2 при электровзрывном напылении, входит в твердый раствор фазы на основе никеля. Фаза на основе серебра заполняет промежутки между фазой на основе никеля и титана. В переходной области также выявлены крупные частицы, состоящие из TiB_2 .

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

Для цитирования: Почетуха В.В., Романов Д.А., Денисенко Е.С., Громов В.Е. Тонкая структура электровзрывного покрытия из диборида титана, никеля и серебра // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 4 (150). С. 35–42. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-04](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-04).

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

Введение

Для разработки электроэрозионностойких электрических контактов понимание влияния тонкой структуры на электрические свойства имеет первостепенное значение [1–3]. Во многих случаях исследования этих материалов методом просвечивающей электронной микроскопии включают эксперименты по отжигу и других термических обработок для мониторинга изменений в зависимости от температуры [4]. Сверхбыстрая просвечивающая электронная микроскопия является ценным инструментом для исследования промежуточных стадий быстрых динамических процессов в материалах [5]. Понимание структурной стабильности наноматериалов, таких как нанопроволоки, необходимо для их практического применения [6, 7]. Используя сверхбыструю просвечивающую электронную микроскопию с одним импульсом, авторы [8] зафиксировали поведение неустойчивости Плато — Рэлея серебряных нанопроволок, распадающихся на серебряные наночастицы при лазерном облучении в наносекундных временных масштабах. За последние годы в нашей исследовательской группе проведен ряд исследований в области формирования электроэрозионностойких покрытий различных систем с применением метода электровзрывного напыления [9, 10].

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

Материал и методы исследования

Покрытия напыляли на образцы электротехнической меди марки М00 (химический состав, масс. %: Cu 99,99; Fe 0,001; Ni 0,001; S 0,001; P 0,001; As 0,001;

during electro-explosive spraying, is included in the solid solution of the nickel-based phase. The silver-based phase fills the gaps between the nickel-based and titanium-based phases. There are large particles consisting of TiB_2 also found in the transition region.

Keywords: composite coating, electro-explosive spraying, fine structure, nanostructure, titanium diboride, nickel, silver, copper substrate, phase, transmission electron microscopy

For citation: Pochetukha V.V., Romanov D.A., Denisenko E.S., Gromov V.E. Fine Structure of an Electroexplosive Coating Consisting of Titanium Diboride, Nickel, and Silver. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 4 (150). P. 35–42. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)4-04](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)4-04).

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

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 $25 \times 25 \times 5$ 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).

Тонкую структуру образцов анализировали с помощью универсального термополевого просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM-2100 (произведен в Японии) с приставкой для рентгеновского микроанализа Oxford Instruments INCA Energy.

Результаты и их обсуждение

На дифракционной картине (рис. 1) видны практически кольцевые электронограммы, представленные как минимум тремя ГЦК-решетками. Вероятно, эти отражения дают субмикронные частицы, являющиеся твердыми растворами на основе Cu, Ni и Ag, что подтверждается данными элементного анализа. На светопольных (СП) и темнопольных (ТП) изображениях видны различной формы (округлые, прямоугольные, неправильной формы, в виде оболочек) частицы (рис. 2).

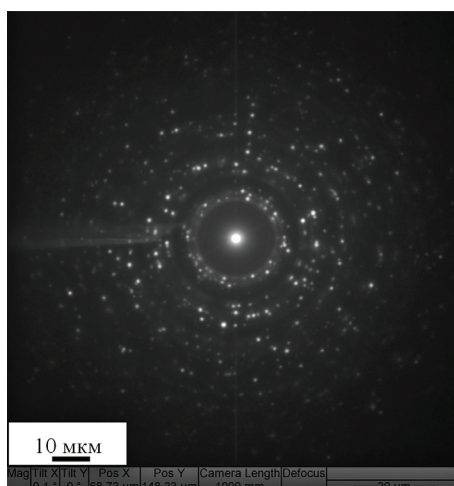


Рис. 1. Увеличенное изображение микродифракционной картины, полученной с участка покрытия системы $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$ после электровзрывного напыления

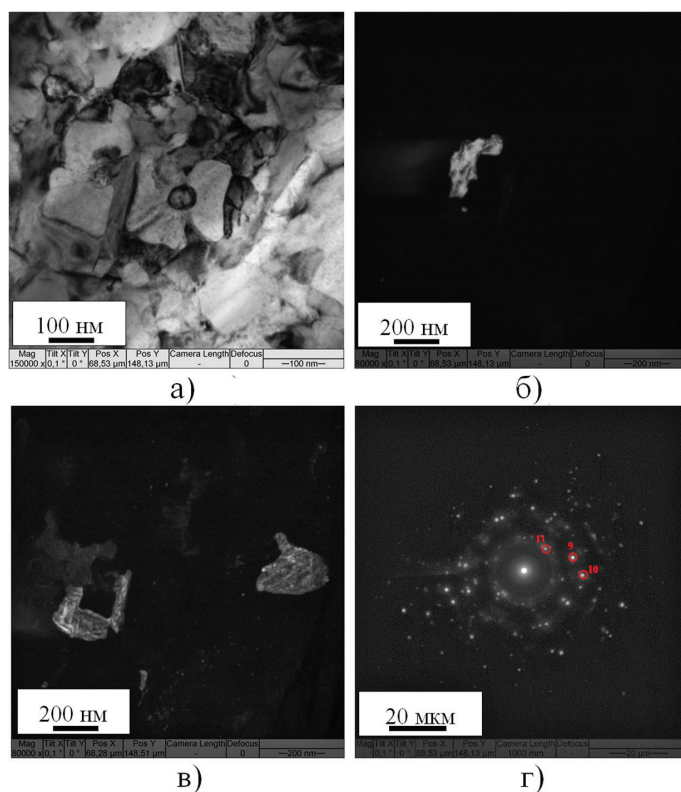


Рис. 2. Характерное светловольное изображение (а) ПЭМ-структуры покрытия системы $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$ после электровзрывного напыления и темнопольные изображения в рефлексах 9 (б) и 11 (в), а также микродифракционная картина (г)

При сопоставлении данных элементного анализа (рис. 3), дифракционной картины (рис. 2г) и ТП изображений в рефлексах 9 (рис. 2 б) и 11 (рис. 2в), «серая» фаза на СП изображении (рис. 2а), в том числе в виде «оболочек» на прямоугольных частицах, принадлежат ГЦК твердому раствору на основе Ag. В то время как «белая» фаза — ГЦК твердый раствор на основе Cu (фазы указаны теми же цветами, что и карты элементов при картировании). При этом

следует иметь в виду наличие в твердых растворах ГЦК фаз также Ni и Ti. Внутри прямоугольных частиц наблюдаются округлые наноразмерные частицы, которые, вероятно, являются бориды TiB_2 . То, что на элементном анализе спектры от таких частиц незначительно отличаются от окружающего объема, может быть связано с тем, что итоговый спектр дает объем, расположенный под округлой частицей.

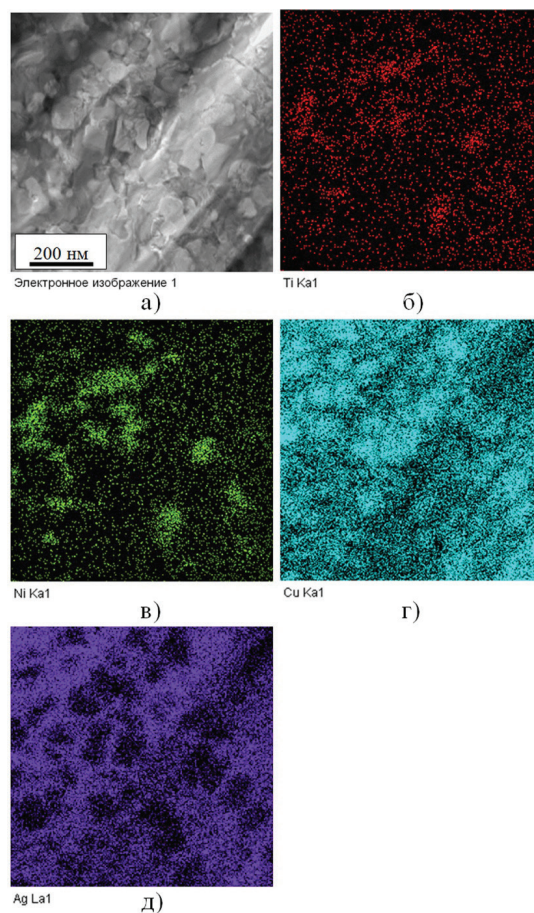


Рис. 3. Элементный анализ участка (а) к рис. 4г в характеристических рентгеновских излучениях титана (б), никеля (в), меди (г) и серебра (д)

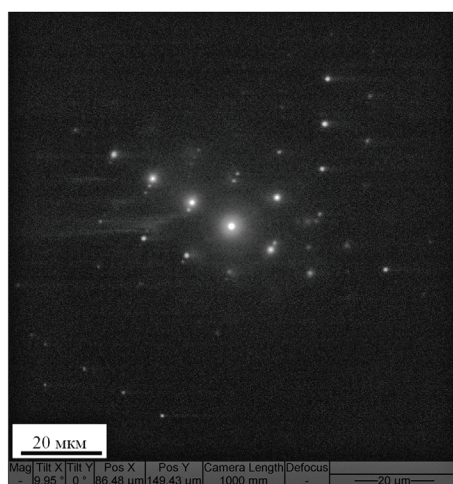


Рис. 4. Изображение микродифракционной картины, полученной с участка покрытия системы $\text{TiB}_2\text{-Ni-Ag}$, и схема ее расшифровки

Подробный анализ дифракционной картины (рис. 4) выявляет также ГЦК фазу на основе Ni (твердый раствор на основе Ni). Ось зоны этой фазы близка к [110]. Помимо этой ГЦК фазы, на микродифрак-

ционной картине (МД) есть еще рефлексы от другой фазы (вероятно, ГЦК), которая не находится в точном отражающем положении.

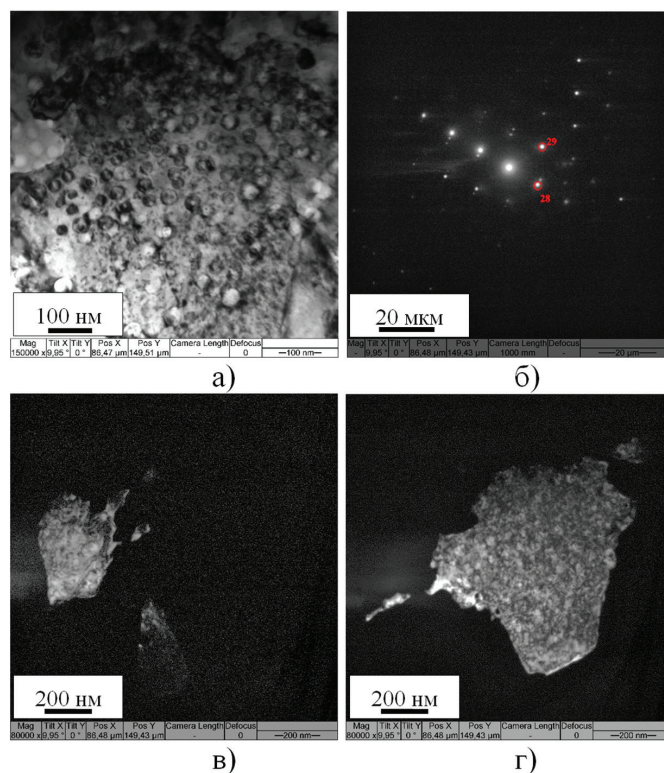


Рис. 5. Светлопольное изображение (а), микродифракционная картина (б) с отмеченными рефлексами и темнопольные изображения (с большим увеличением) в рефлексах (28 – в) и (29 – г), соответственно фазы на основе Ni

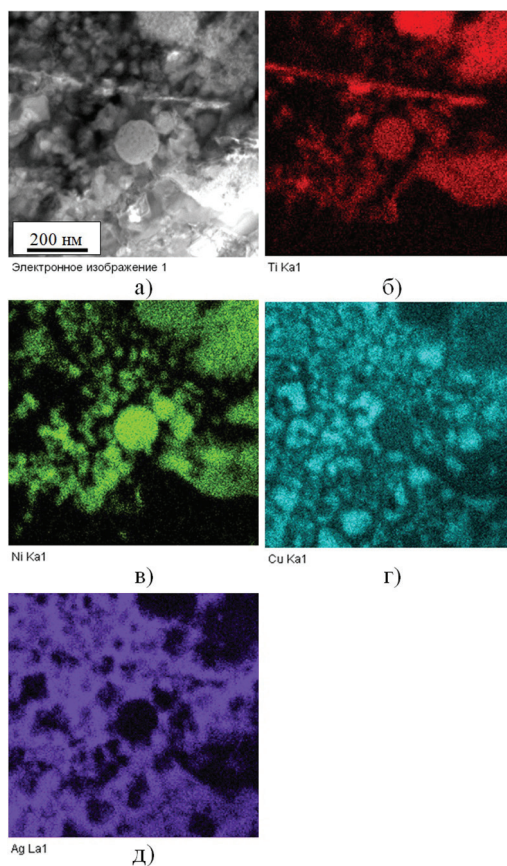


Рис. 6. Элементный анализ увеличенного участка (а) к рисунку 7 в характеристических рентгеновских излучениях титана (б), никеля (в), меди (г) и серебра (д)

На рисунке 5 представлены округлые наноразмерные частицы, залегающие в «матрице». Темнопольный анализ (рис. 5) к МД с рисунка 4 представляет субмикронные частицы «матрицы» ГЦК фазы на основе Ni с характерным контрастом внутри частиц. Контраст связан с начальной стадией распада твердого раствора при образовании каких-либо других фаз. Судя по результатам элементного анализа (рис. 6), крупные округлые частицы обогащены по Ti и Ni, в то время как другие округлые частицы — по Cu. Участки, со-

держивающие твердый раствор на основе Ag, в основном не совпадают с участками, обогащенными Ti, Ni и Cu.

Расшифровка дифракционной картины позволила определить ГЦК фазы на основе Cu, Ag и Ni. Дифракционная картина, полученная с переходной области, выявила верхнюю часть кадра — медную подложку и нижнюю часть с наноразмерными частицами, представленными твердыми растворами на основе Cu, Ag и Ni. Титан входит в твердый раствор фазы на основе никеля. Фаза на основе серебра заполняет промежутки между фазой на основе никеля и титана.

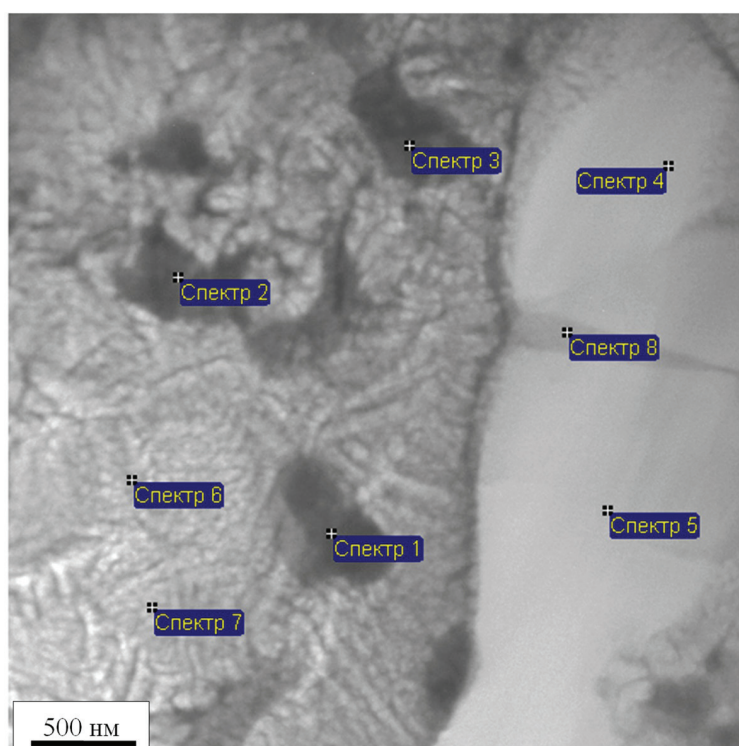


Рис. 7. Просвечивающая растровая электронная микроскопия

Элементный анализ по точкам к рисунку 7

Спектр	В стат.	Ti	Ni	Cu	Ag	Итог
Спектр 1	Да	12,67	18,80	17,25	51,28	100
Спектр 2	Да	25,06	8,59	20,75	45,60	100
Спектр 3	Да	14,74	6,74	22,40	56,11	100
Спектр 4	Да	89,85	1,23	5,17	3,75	100
Спектр 5	Да	90,30	1,51	5,09	3,10	100
Спектр 6	Да	42,94	35,02	15,76	6,28	100
Спектр 7	Да	51,51	30,95	11,71	5,84	100
Спектр 8	Да	80,39	9,60	6,33	3,68	100

В других участках фольги наблюдается структура, отличная по морфологии от представленных выше (рис. 7, табл.). Справа на этом рисунке расположены крупные частицы, практически полностью состоящие из титана (бор не показан ввиду значительной ошибки по этому элементу, спектры 4, 5, 8). Отсутствие контуров экстинкции в этих частицах позволяет пред-

положить, что эти частицы практически не деформируются и, вероятно, являются боридами на основе титана (TiB_2). Слева наблюдается структура, подобная «эвтектике», где есть «темная» и «светлая» фазы. «Темная» фаза может быть как отдельными относительно крупными частицами, так и относительно тонкими пластинами в «светлой» фазе (перлитопод-

добная структура). При этом «темная» фаза является твердым раствором Ti-Ni-Cu. В «светлой» фазе, по-видимому, отличное от «темной» содержание основных элементов. Предположительно, в левой части изображения наблюдается распад твердого раствора с образованием новых фаз. Помимо этого, на дифракционных картинах присутствует множество рефлексов, которые могут принадлежать в том числе интерметаллиду на основе Ti-Ni-Cu.

Заключение

Тонкая структура покрытия представляет собой твердые растворы на основе меди, никеля и серебра, в которых располагаются наноразмерные частицы диборида титана. Локально установлена начальная стадия распада твердых растворов при образовании каких-либо других фаз. В переходной области меж-

ду покрытием и подложкой нанокристаллическая структура покрытия также представляет собой наноразмерные частицы, представленные твердыми растворами на основе меди, серебра и никеля. Также титан, который образовался после частичного распада фазы диборида титана при электровзрывном напылении, входит в твердый раствор фазы на основе никеля. Фаза на основе серебра заполняет промежутки между фазой на основе никеля и титана. В переходной области также выявлены крупные частицы, практически полностью состоящие из титана, а поскольку бор не определен ввиду значительной ошибки по этому элементу при ПЭМ исследованиях, отсутствие контуров экстинкции в этих частицах доказывает, что эти частицы практически не деформируются и являются диборидом титана.

Библиографический список

1. Miyake K., Sommawan Kh., Takamatsu S., et al. Research on Electrical Contact Structures for Woven Electronic Textiles at BEANS Project // *Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging*. 2013. Vol. 16 (2). P. 96–100. <https://doi.org/10.5104/jiep.16.96>
2. Lei X., Feng Ch., Lv W., et al. Electrical Contact Reliability Investigation of High-Speed Electrical Connectors Under Fretting Wear Behavior // *Microelectronics Reliability*. 2024. Vol. 162. P. 115510. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2024.115510>
3. Aleutdinova M.I., Kolybaev A.V., Fadin V.V. Structure of Contact Layer of Steel (0.2 % C) and Electrical Conductivity of Contact in Sliding on Steel Under Alternative Electric Current with Different Turn Ratios of Current Source // *Russian Physics Journal*. 2022. Vol. 65. P. 1041–1047. <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02730-1>
4. Verheijen M.A., Donkers J.J.T.M. Transmission Electron Microscopy Specimen Holder for Simultaneous in Situ Heating and Electrical Resistance Measurements // *Review of Scientific Instruments*. 2004. Vol. 75 (2). P. 426–429. <https://doi.org/10.1063/1.1611616>
5. Kumari S., Freund M., Ortalan V. Investigating the Rapid Failure of Focused Ion Beam Deposited Electrical Contacts: An In-Situ and Ultrafast Transmission Electron Microscopy

- Approach // *Nano Letters*. 2025. Vol. 25 (12). P. 1530–6984. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c05269>
6. Hsu Ch.-Y., Rheima A.M., Abbas Z., et al. Nanowires Properties and Applications: A Review Study // *South African Journal of Chemical Engineering*. 2023. Vol. 46. P. 286–311. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.08.006>
7. Goktas N.I., Wilson P., Ghukasyan A., et al. Nanowires for Energy: A Review // *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5 (4). P. 041305. <https://doi.org/10.1063/1.5054842>
8. Jiang Sh., Ortalan V. Capturing Plateau-Rayleigh Instability in Silver Nanowires Via Ultrafast Electron Microscopy // *Nano Research*. 2024. Vol. 17 (9). P. 8402–8407. <https://doi.org/10.1007/s12274-024-6770-7>
9. 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>
10. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., et al. Increase in Properties of Copper Electrical Contacts in Formation of Composite Coatings Based on Ni-C-Ag-N System // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 19. P. 947–966. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.040>

References

1. Miyake K., Sommawan Kh., Takamatsu S., et al. Research on Electrical Contact Structures for Woven Electronic Textiles at BEANS Project. *Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging*. 2013. Vol. 16 (2). P. 96–100. <https://doi.org/10.5104/jiep.16.96>
2. Lei X., Feng Ch., Lv W., et al. Electrical Contact Reliability Investigation of High-Speed Electrical Connectors Under Fretting Wear Behavior. *Microelectronics Reliability*. 2024. Vol. 162. P. 115510. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2024.115510>
3. Aleutdinova M.I., Kolybaev A.V., Fadin V.V. Structure of Contact Layer of Steel (0.2% C) and Electrical Conductivity of Contact in Sliding on Steel Under Alternative Electric Current with Different Turn Ratios of Current Source. *Russian Physics Journal*. 2022. Vol. 65. P. 1041–1047. <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02730-1>

4. Verheijen M.A., Donkers J.J.T.M. Transmission Electron Microscopy Specimen Holder for Simultaneous in Situ Heating and Electrical Resistance Measurements. *Review of Scientific Instruments*. 2004. Vol. 75 (2). P. 426–429. <https://doi.org/10.1063/1.1611616>
5. Kumari S., Freund M., Ortalan V. Investigating the Rapid Failure of Focused Ion Beam Deposited Electrical Contacts: An In-Situ and Ultrafast Transmission Electron Microscopy Approach. *Nano Letters*. 2025. Vol. 25 (12). P. 1530–6984. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c05269>
6. Hsu Ch.-Y., Rheima A.M., Abbas Z., et al. Nanowires Properties and Applications: A Review Study. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2023. Vol. 46. P. 286–311. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.08.006>
7. Goktas N.I., Wilson P., Ghukasyan A., et al. Nanowires for Energy: A Review. *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5 (4). P. 041305. <https://doi.org/10.1063/1.5054842>
8. Jiang Sh., Ortalan V. Capturing Plateau–Rayleigh Instability in Silver Nanowires Via Ultrafast Electron Microscopy. *Nano Research*. 2024. Vol. 17 (9). P. 8402–8407. <https://doi.org/10.1007/s12274-024-6770-7>
9. 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>
10. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., et al. Increase in Properties of Copper Electrical Contacts in Formation of Composite Coatings Based on Ni-C-Ag-N System. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 19. P. 947–966. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.040>

Информация об авторах

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

Д.А. Романов, доктор технических наук, профессор кафедры информационно-технических и экономических дисциплин, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Новокузнецке, Новокузнецк, Россия;

Е.С. Денисенко, кандидат технических наук, доцент кафедры естественно-научных и экономических дисциплин, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал 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, Professor of the Department of Information Technology and Economics, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Novokuznetsk Branch, Novokuznetsk, Russia;

E.S. Denisenko, Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor, Department of Natural Sciences and Economics, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch, 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.