

## Оригинальная статья

УДК 621.793.79

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-10-21

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ПОКРЫТИЕ (Ag – C) / ПОДЛОЖКА (Cu), ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2024 г. Д. А. Романов<sup>1</sup>, С. В. Московский<sup>1</sup>, В. В. Почетуа<sup>1</sup>, Е. С. Ващук<sup>2</sup>,  
Ю. Ф. Иванов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск (Россия, 653039, Кемеровская обл. – Кузбасс, Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а)

<sup>3</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

**Аннотация.** Полученная система Ag – C, сформированная на медной подложке, характеризуется толщиной покрытия от 50 до 550 мкм. В покрытии углеграфитовое волокно присутствует в виде пластин. Покрытие представляет собой легированный атомами меди агрегат. Изменение концентрации атомов меди при изменении расстояния от поверхности покрытия в глубину имеет положительный градиент. Формирование твердых растворов внедрения на основе меди и серебра подтверждено данными рентгенофазового анализа. Исследования методом микрорентгеноспектрального анализа фольг для просвечивающей электронной микроскопии показали, что медь в покрытии располагается в виде тонких прослоек по границам зерен серебра или формирует включения (зерна) субмикрористаллических размеров. Установлено, что графит присутствует в виде наноразмерных (10 – 15 нм) частиц в объеме зерен серебра и зерен меди, а также располагается на границах зерен серебра. В системе Ag – C / Cu выявлено формирование переходного слоя толщиной 250 – 300 нм. Размер субзерен в переходном слое изменяется в пределах 150 – 250 нм. Модуль Юнга и микротвердость по Виккерсу уменьшаются с увеличением толщины покрытия. Износостойкость покрытия составляет  $6 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м). Полученный набор свойств и характеристик структуры позволяет сделать вывод о пригодности сформированных покрытий для работы в электрических контактах мощных электрических сетей. Конкретный выбор определенной модели контактов требует дополнительных уточняющих исследований.

**Ключевые слова:** низкоэнергетический импульсный электронный пучок, серебро, углеграфитовое волокно, медь, наноразмерные частицы, твердость, модуль Юнга, износостойкость

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4292.2022.4. Электровзрывное напыление проведено с использованием оборудования научной лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий (лаборатория создана согласно постановлению Правительства Кемеровской области – Кузбасса № 632 от 19 сентября 2022 г., соглашение № 8). Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

**Для цитирования:** Романов Д.А., Московский С.В., Почетуа В.В., Ващук Е.С., Иванов Ю.Ф. Структура и свойства системы покрытие (Ag – C) / подложка (Cu), облученной импульсным электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):10–21. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-10-21](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-10-21)

*Original article*

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SYSTEM COATING (Ag – C) / SUBSTRATE (Cu), IRRADIATED BY A PULSED ELECTRON BEAM**

© 2024 D. A. Romanov<sup>1</sup>, S. V. Moskovskii<sup>1</sup>, V. V. Pochetukha<sup>1</sup>, E. S. Vashchuk<sup>2</sup>,  
Yu. F. Ivanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

<sup>2</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch (19a Nogradskaya Str., Prokopyevsk, Kemerovo region – Kuzbass 653039, Russian Federation)

<sup>3</sup>Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

**Abstract.** The resulting Ag – C system formed on a copper substrate is characterized by a highly developed coating thickness from 50 to 550  $\mu\text{m}$ . In the coating, carbon-graphite fiber is present in the form of plates. The coating is an aggregate doped with copper atoms. The change in the concentration of copper atoms with a change in the distance from the coating surface to the depth has a positive gradient. The formation of interstitial solid solutions based on copper and silver is confirmed by X-ray phase analysis data. Studies by X-ray microanalysis of foils for transmission electron microscopy showed that copper in the coating is located in the form of thin layers along the boundaries of silver grains, or forms inclusions (grains) of submicrocrystalline sizes. It was established that graphite is present in the form of nanosized (10 – 15 nm) particles in the volume of silver grains and copper grains, and is also located at the boundaries of silver grains. In the Ag – C / Cu system, the formation of a transition layer with a thickness of 250 – 300 nm was revealed. The size of subgrains in the transition layer varies within 150 – 250 nm. The obtained set of properties and characteristics of the structure allows us to draw a conclusion about the suitability of the formed coatings for work in electrical contacts of powerful electrical networks. The specific choice of a certain model of contacts requires additional clarifying studies.

**Key words:** low energy pulsed electron beam, silver, carbon graphite fiber, copper, nanoparticles, hardness, Young's modulus, wear resistance

**Funding.** The study was carried out with the financial support of the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of science MK-4292.2022.4. Electroexplosive coating was carried out using the equipment of the scientific laboratory of electroexplosive spraying of highly reliable coatings (laboratory created in accordance with the Decree of the Government of the Kemerovo Region – Kuzbass No. 632 of September 19, 2022, agreement No. 8). The studies were carried out using the equipment of the Collective Use Center "Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State Technical University".

**For citation:** Romanov D.A., Moskovskii S.V., Pochetukha V.V., Vashchuk E.S., Ivanov Yu.F. Structure and properties of the system coating (Ag – C) / substrate (Cu), irradiated by a pulsed electron beam. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):10–21. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-10-21](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-10-21)

**Введение**

В настоящее время актуальной проблемой электротехники является получение материалов, из которых изготавливаются электрические контакты. Взаимодействующие контакты должны быть прочными, стойкими к электрокоррозии, залипанию и окислению в процессе включения и выключения электрической цепи, а также обладать высокими тепло- и электропроводностью. Такие требования к материалам реализовываются в композиционных покрытиях.

Максимальные значения электропроводности наблюдаются у сплавов, в составе которых присутствуют углерод, медь, золото, серебро, кобальт, алюминий, никель [1; 2] в различных концентрациях.

В низковольтной энергетике широкое применение нашли электрические контакты на основе серебра с добавлением углерода (в количестве нескольких массовых процентов) в виде графита [3 – 8]. Однако эти контакты обладают недостатками: наблюдаются сильное прогорание и

плохое рассеивание дуги. В настоящем исследовании была предпринята попытка применить вместо порошка графита углеграфитовое волокно, которое служит каркасом изделия, а в качестве матрицы применяются различные металлы.

Самые высокие тепло- и электропроводность имеет серебро, но оно имеет низкую твердость. Как правило, в электрических соединениях должны использоваться контакты из одного и того же материала. Контакт серебро – серебро имеет относительно большую электропроводность. Серебро также имеет хорошие характеристики при пайке, а его оксиды обеспечивают проводимость тока. Именно поэтому серебро может быть подходящим материалом в сочетании с медью [9; 10], примеси которой увеличивают твердость и понижают эрозию.

Серебряные сплавы применяются в слаботоковых электромагнитных реле постоянного или переменного тока частотой 50 Гц для управления аппаратурой автоматики и связи в цепях повышенной мощности. Композиционные сплавы востребованы для изготовления в электромеханических реле для устройств сигнализации, контактов автоматов, электрических щеток, контакт-деталей заклепочного типа, контактов реле в блоках питания, централизации и блокировки на железнодорожном транспорте [1; 2; 8].

Композиционные сплавы должны обладать максимальными эксплуатационными свойствами, которые обеспечат их работоспособность в количестве более миллиона циклов замыкания и размыкания [1; 2; 8].

Электроконтакты на основе графита создают химическим осаждением металлов. С помощью ионно-плазменной струи происходит насыщение упрочняемой поверхности металлами. Для придания детали нужных размеров и требуемого качества поверхности проводят фрезерование и шлифование детали [11 – 13].

Одним из способов получения композиционных материалов медь – серебро – углерод является порошковая металлургия: порошки различных материалов загружаются в формы, прессуются, а затем спекаются, в результате частицы порошков «слипаются» за счет взаимной диффузии. После спекания определенные значения шероховатости поверхности достигаются резанием или шлифованием [5; 14; 15]. Рассматриваемое композиционное соединение имеет большую практическую значимость, соответственно, необходимо научное исследование получаемой структуры этого соединения.

Одним из интересных вариантов является получение нанокристаллов, которые обладают повышенными физическими свойствами [1; 13 – 18].

В последние 20 лет развивается метод электро-взрывного напыления высоконадежных покрытий с помощью плазменных струй продуктов взрыва проводников. Этот метод позволяет формировать покрытия со структурой субмикро- и нанометрового диапазонов [1; 8; 14; 15]. В настоящей работе для сглаживания неровностей поверхности покрытия, устранения пор и неоднородностей используется дополнительная электронно-пучковая обработка вместо механической обработки, что позволяет избежать потерь нанесенного материала.

Целью настоящей работы является изучение структуры и свойств композиционного покрытия серебро – углерод на медных электродах после обработки импульсным электронным пучком.

### Методы и принципы исследования

Предметом исследования являются электро-взрывные покрытия серебро – углерод, сформированные на медных электродах. В результате электрического взрыва серебряной фольги массой 400 мг и углеграфитового волокна массой 50 мг при плотности мощности 5,5 ГВт/м<sup>2</sup> было создано покрытие на облучаемой поверхности (на меди). Давление в ударно-сжатом слое около места обработки составляет примерно 12,5 МПа, остаточное давление газа в рабочей камере приблизительно 100 Па, температура оплавления поверхности порядка 10<sup>4</sup> К, время плазменного воздействия составляет 100 мкс. Покрытия напыляли на образцы-мишени из электротехнической меди. Химический состав меди приведен в работе [1]. После электро-взрывного напыления медные образцы-мишени с покрытием подвергали дополнительному облучению импульсным электронным пучком с характеристиками: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 60 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов 0,3 с<sup>-1</sup>, количество импульсов 10.

Элементный и фазовый составы исследовали на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 Tescan и просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100F, JEOL. Проведен рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы поверхности на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 в медном отфильтрованном излучении Cu-K<sub>α1</sub> (монокроматор CM-3121). Микротвердость измеряли на приборе TTX-NHT S/N: 01-04538. Методика эксперимента указана в работе [1]. Определен модуль Юнга. Износостойкость определяли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester [1]. Профиль канавки износа и ее параметры исследовали контактным нанопрофилометром.

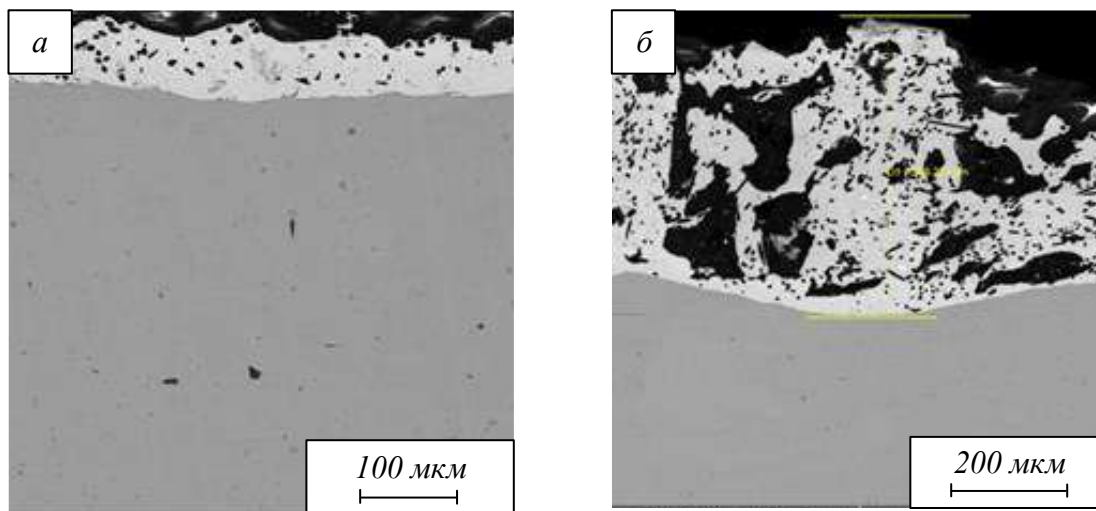


Рис. 1. Сканирующая электронная микроскопия поверхности серебро – углерод на медном электроде при различном увеличении (поперечный шлиф)

Fig. 1. Scanning electron microscopy of the silver-carbon surface on a copper electrode at different magnifications (cross section)

### Основные результаты

Электронно-микроскопические исследования поперечных травленных шлифов данной системы показали формирование слоев неоднородной структуры (рис. 1) толщиной от 50 до 550 мкм. Покрытие имеет неоднородный фазовый состав и содержит включения преимущественно пластинчатой (цилиндрической) формы и микрокристаллических размеров (рис. 1).

Как и следовало ожидать, включения являются графитом, что было убедительно показано методами микрорентгеноспектрального анализа (метод картирования), результаты которого приведены на рис. 2. Часто включения графита в

системе покрытие (Ag – C) / подложка (медь) наблюдаются в виде скоплений разнообразной формы и размеров (рис. 3). В совокупности это указывает на формирование в покрытии механической смеси двух фаз: серебра и графита.

Метод картирования «по точкам» продемонстрировал распределение химических элементов покрытия в количественном отношении. Результаты такого исследования приведены на рис. 4 и 5, а также представлены в табл. 1. Анализируя представленные данные, можно отметить неоднородное распределение химических элементов в покрытии. Кроме этого, отчетливо

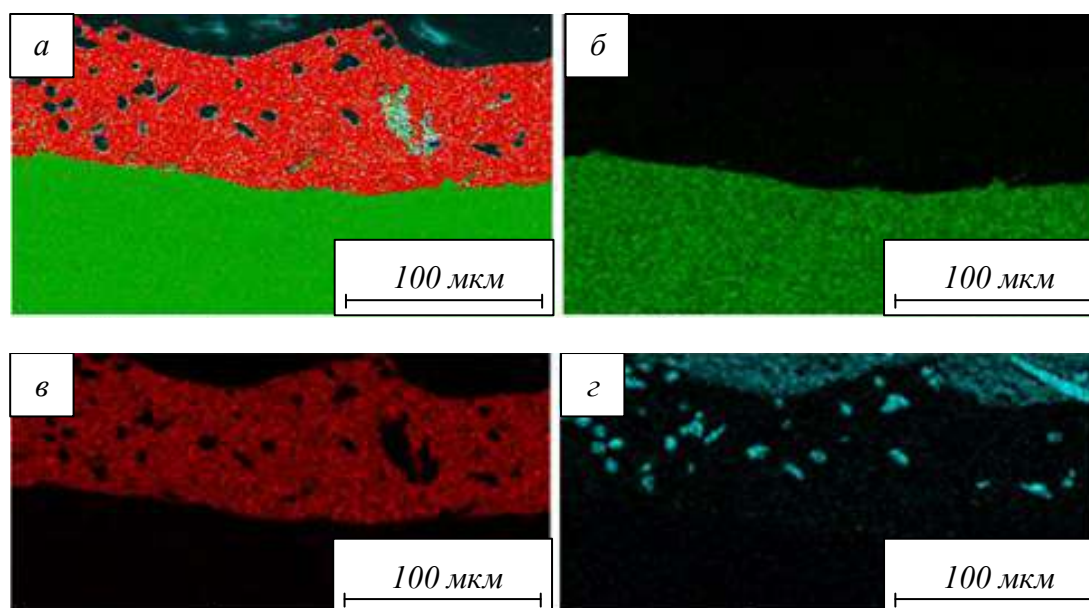


Рис. 2. Характеристическое рентгеновское излучение атомов меди (б), серебра (в) и углерода (z): а – многослойная карта ЭДС, полученная наложением изображений (б – z) поверхности серебро – углерод на медном электроде

Fig. 2. Characteristic X-ray emission of copper (b), silver (v) and carbon (z) atoms a is a multilayer EMF map obtained by superimposing images (b – z) of the silver-carbon surface on a copper electrode

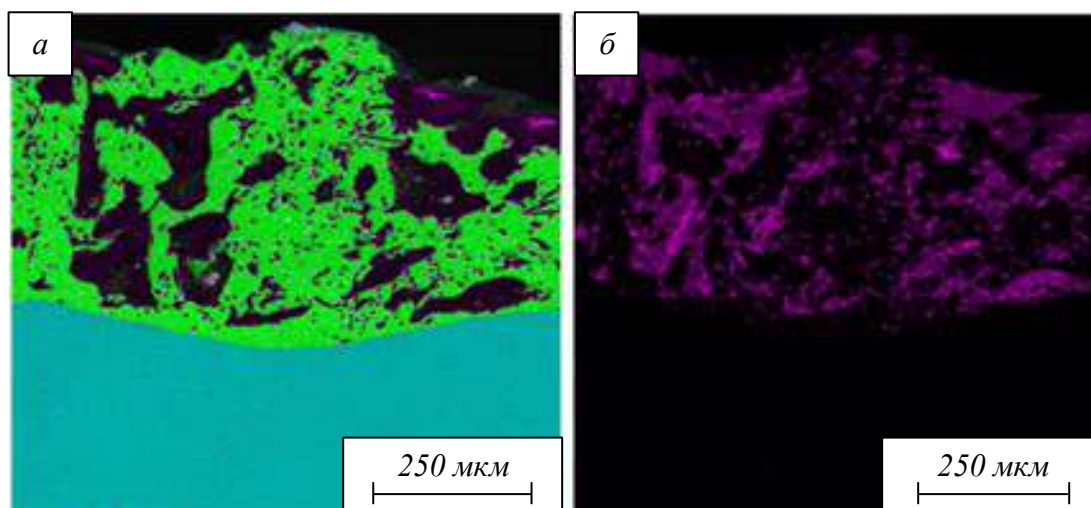


Рис. 3. Многослойная карта ЭДС поверхности серебро – углерод (а) и соответствующе ей характеристические рентгеновские излучения атомов углерода (фиолетовый цвет), серебра (зеленый цвет) и меди (голубой цвет) (б)  
 Fig. 3. Multilayer EMF map of the silver-carbon surface (a), corresponding to its characteristic X-ray emission of carbon atoms (purple color), silver (green color) and copper (blue color) (b)

видно легирование покрытия атомами меди (подложка). При этом концентрация атомов меди увеличивается по мере удаления от поверхности покрытия.

Рентгенофазовый анализ поверхности показал формирование двухфазного покрытия (рис. 5). Сплав серебро – медь имеет эвтектический состав, в котором растворимость элементов друг в друге незначительна. Температура эвтектического равновесия системы серебро – медь составляет 781 °С, а концентрация меди – 39,8 ат. %. Предельная растворимость меди в серебре составляет 13,6 ат. %, а предельная растворимость серебра в меди – 4,9 ат. % [19; 20].

Относительная массовая доля фаз и их параметры приведены в табл. 2.

Анализ результатов относительного фазового содержания, представленного в табл. 2, показывает, что параметр кристаллической решетки меди и серебра отличается от параметра кристаллической решетки чистых металлов. Это свидетельствует о присутствии в покрытии твердого раствора медь – серебро. Графит методами рентгенофазового анализа не выявлен.

Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия дефектной субструктуры показала, что медь в покрытии располагается преимущественно по границам зерен серебра (рис. 6).

Атомы углерода в этом случае не выявляются, что может свидетельствовать об их обособленном расположении в виде композиций из частиц различного размера, как это было показано выше (рис. 1 и 2).

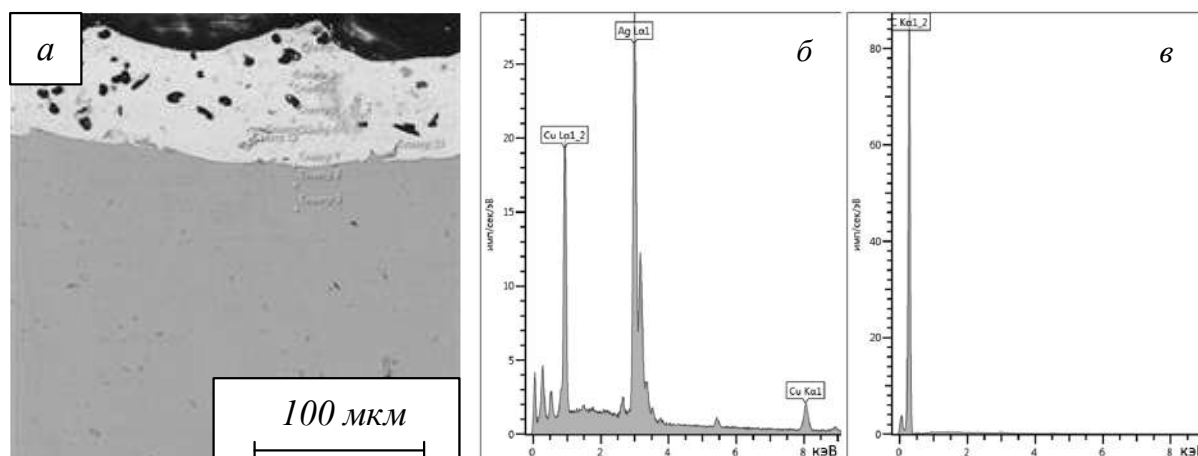


Рис. 4. Сканирующая электронная микроскопия поперечного шлифа поверхности серебро – углерод (а); энергетические спектры, полученные с участков 7 (б) и 4 (в) (на поз. а обозначены локальные точки образца, в которых проведен микроанализ)  
 Fig. 4. Scanning electron microscopy of the cross-section of the silver-carbon surface (a); energy spectra obtained from sites 7 (b) and 4 (c) (on the pos. a the local points of the sample are indicated, in which a X-ray microanalysis was performed)

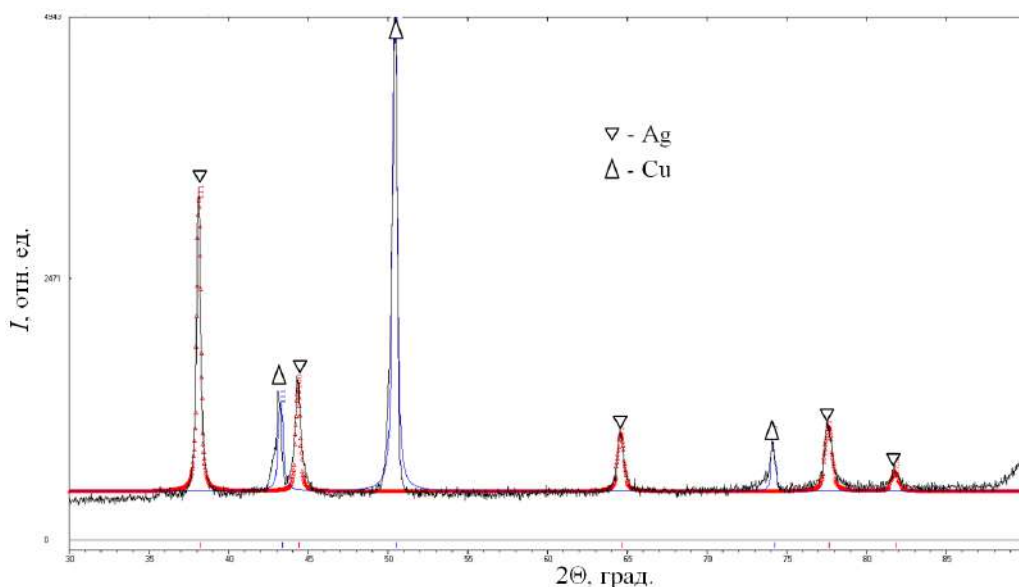


Рис. 5. Рентгенограмма поверхности серебро – углерод после облучения электронным пучком  
 Fig. 5. X-ray diffraction pattern of the silver-carbon surface after electron beam irradiation

Анализ микроэлектронограммы (рис. 7, б) позволяет утверждать, что данный участок покрытия сформирован зернами серебра (рис. 7, в), в объеме которых присутствуют наноразмерные (10 – 15 нм) частицы графита (рис. 7, з). Частицы графита присутствуют также и на границах зерен серебра (рис. 7, в, з).

На рис. 8 приведены электронно-микроскопические изображения участка покрытия, в котором по границам зерен серебра расположены частицы графита (рис. 8, з, е) и прослойки меди (рис. 8, д). В объеме зерен серебра расположены наноразмерные (12 – 15 нм) частицы графита (рис. 8, в).

Электронно-микроскопическое изображение структуры границы контакта покрытия и подложки приведено на рис. 9. Отчетливо видно формирование переходного слоя толщиной 250 – 300 нм субзеренного строения с размером субзерен, изменяющимся в пределах от 150 до 250 нм (рис. 9, з – е). Фазовый состав переходного слоя представлен медью, серебром и графитом.

Результаты исследований механических свойств рассматриваемой системы показывают, что твердость и модуль Юнга снижаются при

удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки (рис. 10).

Трибологические свойства рассматриваемой системы после обработки электронным пучком изменяются. Параметр износа поверхности составляет  $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ , что меньше в 12,2 раза параметра износа медного электрода. Коэффициент трения поверхностных слоев равен 0,3 и равен коэффициенту трения медного электрода.

Таким образом, на основании данных изучения фазового состава и структуры поверхности кратное увеличение твердости полученного слоя и износостойкости покрытия можно соотнести с формированием субмикро- и нанокристаллической многофазной структуры вследствие облучения покрытия импульсным электронным пучком.

### Выводы

Установлено, что создается неоднородный тонкий поверхностный слой серебро – углерод толщиной 50 – 550 мкм. Графит имеет различную форму, но в основном это скопления в виде пластинок, размеры которых достигают наноразмерного диапазона (10 – 15 нм). В этом слое присутствуют атомы меди, по глубине облуче-

Т а б л и ц а 1

Данные микрорентгеноспектрального количественного анализа элементного состава поверхности серебро – углерод, определенные «по точкам» на рис. 4, а  
 Table 1. The data of the X-ray quantitative microanalysis of the elemental composition of the silver-carbon surface, determined "by points" in Fig. 4, a

Элемент	Номер спектра, представленного на рис. 4												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	
Cu	5,6	0	5,6	0	8,9	8,1	37,4	100,0	100,0	17,2	25,6	52,1	
Ag	94,4	0	94,4	0	91,1	91,9	62,6	0	0	82,8	74,4	47,9	



**Данные элементного содержания и параметров кристаллической решетки поверхности серебра – углерод после облучения электронным пучком**

**Table 2. Data on the elemental content and parameters of the crystal lattice of the silver-carbon surface after electron beam irradiation**

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, масс. %	Параметр решетки $a$ , Å	Размер областей когерентного рассеяния, нм	$\Delta d/d$ , $10^{-3}$
Система (Ag – C)/(медь) + электронно-пучковая обработка	Ag	34,4	4,0743	63,29	1,507
	Cu	65,6	3,6106	34,34	1,032

ния их концентрация возрастает. Методами просвечивающей электронной микроскопии выявлено, что медь присутствует в виде прослоек по границам зерен серебра, а также в виде зерен субмикронных размеров. Замечена локализация углерода в зеренной структуре серебра и меди, а также на их границах. Между поверхностным слоем и медной основой присутствует переходный слой толщиной 250 – 300 нм с субзеренной структурой, размер субзерен составляет 150 – 250 нм.

Модуль упругости и микротвердость по глубине покрытия монотонно уменьшаются. Износостойкость увеличивается в 12 раз по сравнению с основой и составляет  $6 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м). Коэффициент трения верхнего слоя и основы составляют 0,3. Высокие твердость и износостойкость упрочненного слоя объясняются формированием субмикро- и нанокристаллической многофазной структуры после электронного импульсного облучения.

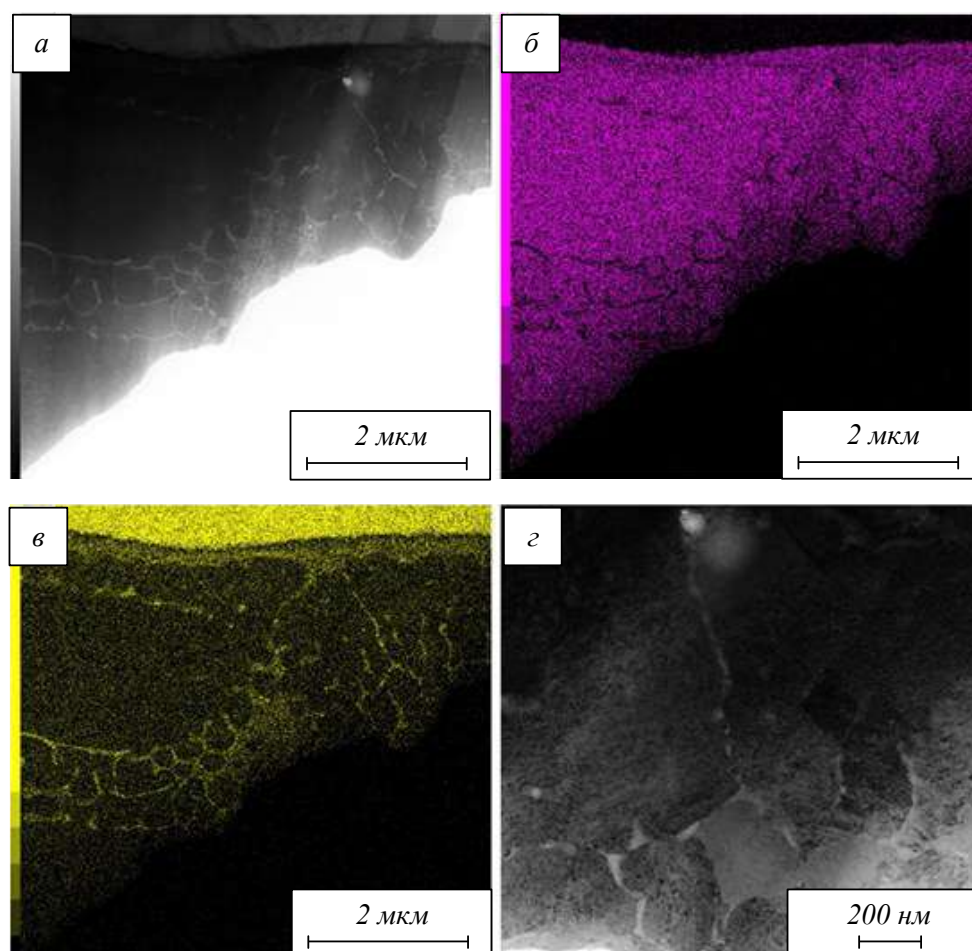


Рис. 6. Электронная микроскопия структуры системы серебро – углерод на медной подложке (а, с), а также изображения участка фольги (а), полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов серебра (б) и меди (в)  
 Fig. 6. Electron microscopy of the structure of the silver-carbon system on a copper substrate (a, c), as well as images of the foil section (a) obtained in the characteristic X-ray radiation of silver (b) and copper (v) atoms

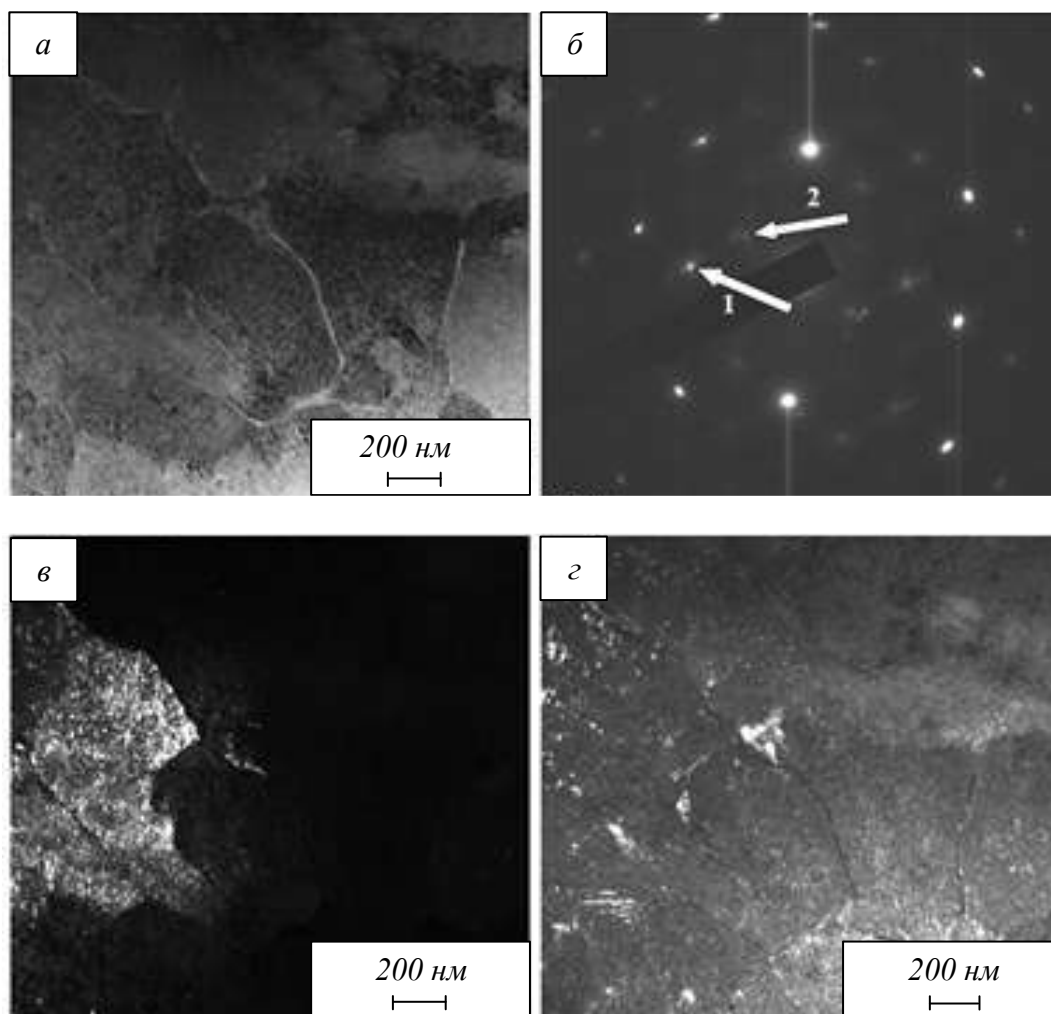


Рис. 7. Светлопольное изображение поверхности серебро – углерод на медном электроде (а); микроэлектроннограмма (б); темнопольные изображения (в, г), полученные в рефлексах  $[022]Ag + [416]C$  (в) и  $[111]Ag + [111]C$  (г). На поз. б стрелками показаны рефлексы, в которых получены темнопольные изображения 1 (в) и 2 (г). Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия

Fig. 7. Light-field image of the silver-carbon surface on a copper electrode (a); X-ray diffraction pattern (б); dark-field images (в, г) obtained in reflections  $[022]Ag + [416]C$  (в) and  $[111]Ag + [111]C$  (г). In pos. б arrows show reflections in which dark-field images 1 (в) and 2 (г) are obtained. Transmission electron diffraction microscopy

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Почетуха В.В., Романов Д.А., Громов В.Е., Филяков А.Д. *Формирование структуры и свойств электровзрывных электроэрозионностойких покрытий на медных контактах переключателей мощных электрических сетей*. Новокузнецк: ООО Полиграфист, 2023:257.
2. Пат. 2380781 С1 РФ № 2008139279/09. Материал для электрических контактов и способ изготовления электрических контактов / В.С. Аркатов, В.В. Васин, Е.Н. Емельянов, А.В. Конаков, В.С. Фадеев, Ю.Л. Чигрин, О.В. Штанов, А.В. Никонов, С.Н. Микушкин, В.С. Минаков. Заявл. 03.10.2008; опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
3. Luo G., Li P., Hu J., Guo J., Sun Y., Shen, Q. Ag and C addition into Al – Cu matrix composites. *Journal of Materials Science*. 2022;(57):11013–11025. <http://doi.org/10.1007/s10853-022-07189-6>
4. Sytschev A.E., Vadchenko S.G., Busurina M.L., Boyarchenko O.D., Karpov A.V. High-temperature interaction between carbon fibers and Cu – Ag eutectic alloy. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2022;31:188–194. <http://doi.org/10.3103/S1061386222040112>
5. Wang J., Hu D., Zhu Y., Guo P. Electrical properties of in situ synthesized Ag-Graphene/Ni composites. *Materials*. 2022;(15(18)):6423. <https://doi.org/10.3390/ma15186423>
6. Li S., Hao Y., Chen X., Gewirth A.A., Moore J.S., Schroeder C.M. Covalent Ag – C bonding contacts from unprotected terminal acetylenes for molecular junctions. *Nano Letters*. 2020;(20,7):5490–5495. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02015>



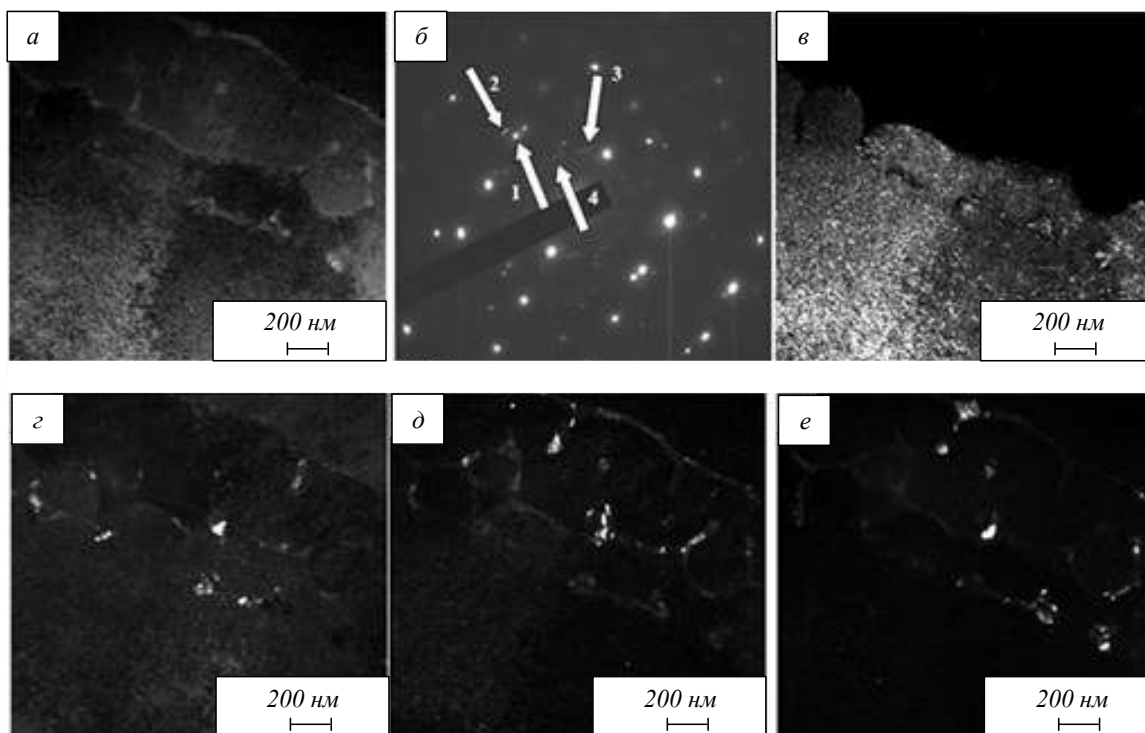


Рис. 8. Светлопольное изображение структуры серебро – углерод на медном катоде (а); микроэлектроннограмма (б); темнопольные изображения (в – е), полученные в рефлексах  $[110]C + [311]Ag$  (в),  $[112]C$  (з),  $[111]Cu$  (д) и  $[205]C$  (е).  
 На поз. б стрелки показывают рефлексы, в которых получены темнопольные изображения 1 – 4 (в – е)  
 Fig. 8. Light-field image of the silver–carbon structure on a copper cathode (a); X-ray diffraction pattern (б); dark-field images (в – е) obtained in reflections  $[110]C + [311]Ag$  (в),  $[112]C$  (з),  $[111]Cu$  (д) and  $[205]C$  (е).  
 On the pos. б arrows show reflections in which dark-field images 1 – 4 (в – е) are obtained

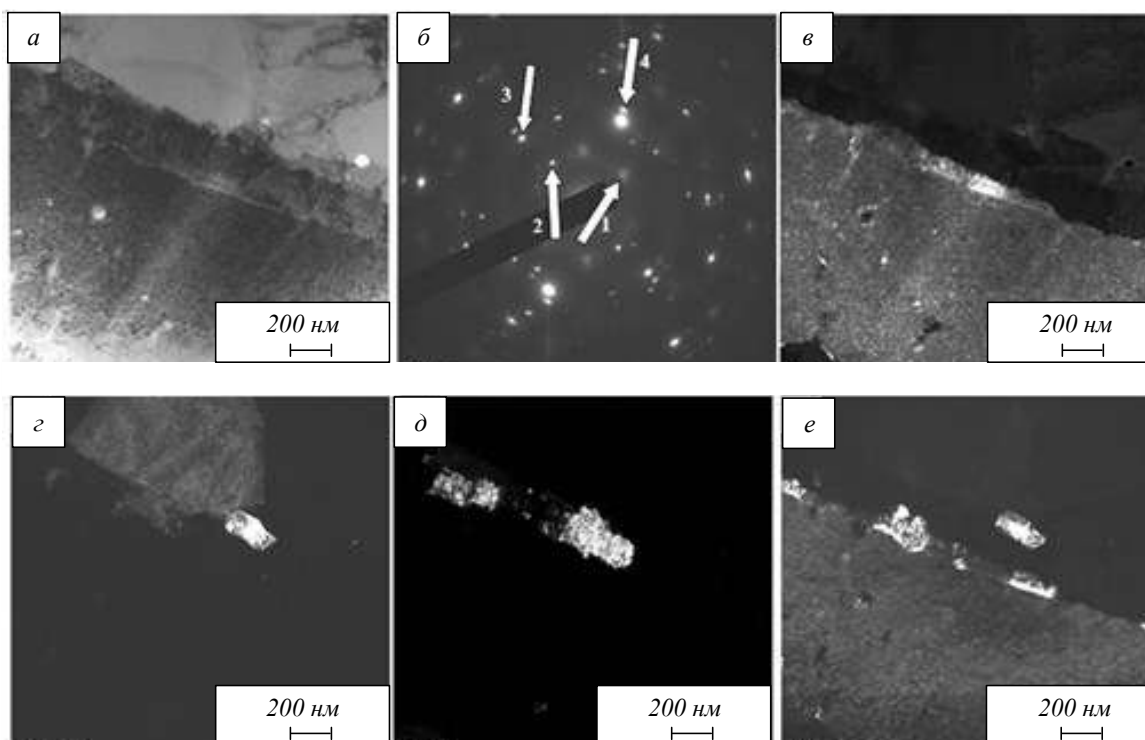


Рис. 9. Светлопольное изображение системы серебро – углерод на медном электроде (а), микроэлектроннограмма (б) и темнопольное изображение, полученное в рефлексе  $[111]Ag + [213]C$  (в),  $[111]Cu + [111]C$  (з),  $[311]Ag + [110]C$  (д) и  $[200]Cu + [006]C$  (е). На поз. б стрелками указаны рефлексы, в которых получены темнопольные изображения 1 – 4 (в – е).  
 Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия  
 Fig. 9. A light-field image of the silver-carbon system on a copper electrode (a), a X-ray diffraction pattern (б) and a dark-field image obtained in the reflection  $[111]Ag + [213]C$  (в),  $[111]Cu + [111]C$  (з),  $[311]Ag + [110]C$  (д) and  $[200]Cu + [006]C$  (е).  
 On the pos. б the arrows indicate reflection in which dark-field images 1 – 4 (в – е) are obtained.  
 Transmission electron diffraction microscopy

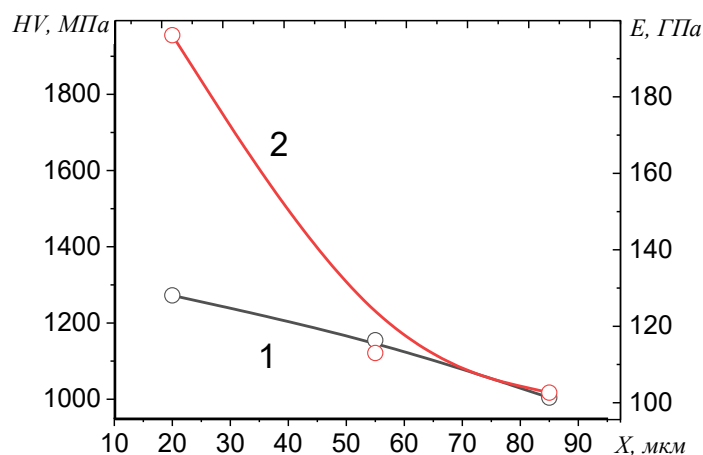


Рис. 10. Зависимости твердости (1) и модуля Юнга (2) от расстояния от поверхности покрытия, облученного импульсным электронным пучком

Fig. 10. Dependences of hardness (1) and Young's modulus (2) on the distance from the surface of the coating irradiated with a pulsed electron beam

7. Fernández S., Molinero A., Sanz D., González J.P., Cruz M., Gandía J.J., Cárabe J. Graphene-based contacts for optoelectronic devices. *Micromachines*. 2020;(11(10)):919. <https://doi.org/10.3390/mi11100919>
8. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., Moskovskii S.V., Gromov V.E., Bataev V.A., Ivanov Yu.F., Semin A.P. 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;19:947–966. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.040>
9. Gaurav A.K., Chang Y., Wojciech T.O., Moreno-Hernandez I.A., Ledendecker M., Alivisatos A.P. Self-Limiting shell formation in Cu@Ag core-shell nanocrystals during galvanic replacement. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2020;11(13):5318–5323. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c01551>
10. Непша Н.И., Веселов А.Д., Савина К.Г., Богданов С.С., Колосов А.Ю., Мясниченко В.С., Сдобняков Н.Ю. Вариабельность структурных превращений в биметаллических наносплавах Cu-Ag. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2022;14:211–226. EDN: GAZINQ; <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2022.14.211>
11. Mousavi Z., Pourabdoli M. Physical and chemical properties of Ag – Cu composite electrical contacts prepared by cold-press and sintering of silver-coated copper powder. *Materials Chemistry and Physics*. 2022;290:126608. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126608>
12. Aikun L., Ming X., Yang Y., Zhang J., Wang S., Chen Y., Zhou W. Effect of CNTs content on the mechanical and arc-erosion performance of Ag-CNTs composites. *Diamond and Related Materials*. 2022;128:109211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109211>
13. Yakout M., Elbestawi M., Veldhuis S.C. A Review of metal additive manufacturing technologies. *Solid State Phenomena*. 2018;278:1–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1>
14. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Akhmadeev Yu.H., Uglov V.V., Shugurov V.V., Petrikova E.A., Krysinina O.V., Prokopenko N.A., Azhazha I.I. Structure and properties of multi-layer films of high-entropy metals deposited by the ion-plasma method. *Russian Physics Journal*. 2022;(64):2207–2213. EDN: IRQUAY; <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02578-5>
15. Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 2. *Ползуновский вестник*. 2022;3:204–215. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>
16. Chen S., Wang J., Yuan Z., Wang Z., Du D. Microstructure and arc erosion behaviors of Ag-CuO contact material prepared by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;(860):158494. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158494>
17. Li H., Wang X., Hu Z., Liu Y. Based electrical contact material under direct current. *Journal of Electronic Materials*. 2020;49:4730–4740. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08193-9>
18. Ma M., Qu Y., Wang Z., Wang J., Du D. Dynamics evolution and mechanical properties of

the erosion process of Ag – CuO contact materials. *Acta Metallurgica Sinica*. 2022;58(10):1305–1315.

<https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00498>

19. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / Под ред. С.В. Шухардина. Москва: Наука, 1979:248.
20. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. В 3-х т. Т. 1. Москва: Машиностроение, 1996:992.

#### REFERENCES

1. Pochetukha V.V., Romanov D.A., Gromov V.E., Filyakov A.D. Formation of the structure and properties of electroexplosive electroerosion-resistant coatings on copper contacts of switches of high-power electrical networks. Novokuznetsk: OOO Poligrafist.2023:257. (In Russ.).
2. Arkatov V.S., Vasin V.V., Emel'yanov E. N.; Konakov A.V., Fadeev V.S.; Chigrin Yu.L., Shtanov O. V., Nikonov A.V., Mikushkin S. N., Minakov V.S. Material for electrical contacts and method of manufacturing electrical contacts. Pat. 2380781 C1 RF No. 2008139279/09. Byullyuten' izobretenii. 2010, no. 3. (In Russ.).
3. Luo G., Li P., Hu J., Guo J., Sun Y. & Shen, Q. Ag and C addition into Al–Cu matrix composites. *Journal of Materials Science*. 2022;(57):11013–11025. <http://doi.org/10.1007/s10853-022-07189-6>
4. Sytshev A. E., Vadchenko S. G. Busurina M. L., Boyarchenko O. D. & Karpov, A. V. High-Temperature Interaction between Carbon Fibers and Cu–Ag Eutectic Alloy. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2022;31:188–194. <http://doi.org/10.3103/S1061386222040112>
5. Wang J., Hu D., Zhu Y. and Guo P. Electrical Properties of In Situ Synthesized Ag-Graphene/Ni Composites. *Materials*. 2022;(15(18)):6423. <https://doi.org/10.3390/ma15186423>
6. Li S., Hao Y., Chen X., Gewirth A.A., Moore J.S., Schroeder C. M. Covalent Ag–C Bonding Contacts from Unprotected Terminal Acetylenes for Molecular Junctions. *Nano Letters*. 2020;(20,7):5490–5495. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02015>
7. Fernández S., Molinero A., Sanz D., González J.P., Cruz M., Gandía J.J., Cárabe J. Graphene-Based Contacts for Optoelectronic Devices. *Micromachines*. 2020;(11(10)):919. <https://doi.org/10.3390/mi11100919>
8. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., Moskovskii S.V., Gromov V.E., Bataev V.A., Ivanov Yu.F., Semin A.P. 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;19:947–966. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.040>
9. Gaurav A.K., Chang Y., Wojciech T. Osowiecki, Moreno-Hernandez I.A., Ledendecker M., Alivisatos A.P. Self-Limiting Shell Formation in Cu@Ag Core–Shell Nanocrystals during Galvanic Replacement. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2020;11(13):5318–5323. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c01551>
10. Nepsha N.I., Veselov A.D., Savina K.G., Bogdanov S.S., Kolosov A.Yu., Myasnichenko V.S., Sdobnyakov N.Yu. Variability of structural transformations in Cu–Ag bimetallic nanoalloys. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. 2022;14:211–226. (In Russ.). EDN: GAZINQ. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2022.14.211>
11. Mousavi Z., Pourabdoli M. Physical and chemical properties of Ag–Cu composite electrical contacts prepared by cold-press and sintering of silver-coated copper powder. *Materials Chemistry and Physics*.2022;290:126608. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126608>
12. Aikun L., Ming X., Yang Y., Zhang J., Wang S., Chen Y., Zhou W. Effect of CNTs content on the mechanical and arc-erosion performance of Ag–CNTs composites. *Diamond and Related Materials*. 2022;128:109211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109211>
13. Yakout M., Elbestawi M., Veldhuis S.C. A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. *Solid State Phenomena*. 2018;278:1–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1>
14. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Akhmadeev Yu. H., Uglov V.V., Shugurov V.V., Petrikova E.A., Krysina O.V., Prokopenko N.A., Azhazha I.I. Structure and Properties of Multi-Layer Films of High-Entropy Metals Deposited by the Ion-Plasma Method. *Russian Physics Journal*. 2022;(64):2207–2213. EDN: IRQUAY; <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02578-5>
15. Komarov D.V., Konovalov S.V., Zhukov D.V., Vinogradov I.S., Panchenko I.A. Analysis of the current situation in the field of electron beam processing of various alloys. Part 2. *Polzunovskii vestnik*.2022;3:204–215. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>
16. Chen S., Wang J., Yuan, Z., Wang Z., Du D. Microstructure and arc erosion behaviors of Ag–CuO contact material prepared by selective

laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;(860):158494.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158494>

17. Hangyu Li, Xianhui Wang, Zhudong Hu & Yanfeng Liu. Based Electrical Contact Material Under Direct Current. *Journal of Electronic Materials*. 2020;49:4730–4740.

<https://doi.org/10.1007/s11664-020-08193-9>

18. Ma M., Qu Y., Wang Z., Wang J., Du D. Dynamics Evolution and Mechanical Properties of the Erosion Process of Ag–CuO Contact Materials. *Acta Metallurgica Sinica*. 2022;58(10):1305–1315.

<https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00498>

19. *Dual and multicomponent copper-based systems*. Ed. / Shukhardin S.V. Moscow: Nauka. 1979:248. (In Russ.).

20. Lyakishev N.P. *Diagrams of the state of double metal systems. Part I*. Moscow: Mashinostroenie. 1996:992. (In Russ.).

#### **Сведения об авторах**

**Денис Анатольевич Романов**, д.т.н., заведующий лабораторией электровзрывного напыления высоконадежных покрытий, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** romanov\_da@physics.sibsui.ru

**ORCID:** 0000-0002-6880-2849

**SPIN-код:** 3930-2963

**Станислав Владимирович Московский**, к.т.н., старший научный сотрудник научной лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** psk-svm@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0008-8298-3800

**Василий Витальевич Почетуа**, к.т.н., старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** v.pochetuha@mail.ru

**ORCID:** 0000-0003-0492-6188

**Екатерина Степановна Ващук**, к.т.н., доцент кафедры экономических и естественно-научных дисциплин, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск

**E-mail:** vaschuk@bk.ru

**ORCID:** 0000-0002-1345-7419

**SPIN-код:** 9811-5528

**Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН

**E-mail:** yufi55@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-8022-7958

**SPIN-код:** 7576-4810

#### **Information about the authors:**

**Denis A. Romanov**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Electroexplosive Spraying of Highly Reliable Coatings, Siberian State Industrial University

**E-mail:** romanov\_da@physics.sibsui.ru

**ORCID:** 0000-0002-6880-2849

**SPIN-код:** 3930-2963

**Stanislav V. Moskovskii**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Electroexplosive Spraying of Highly Reliable Coatings, Siberian State Industrial University

**E-mail:** psk-svm@yandex.ru

**ORCID:** 0009-0008-8298-3800

**Vasilii V. Pochetukha**, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer at the Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University

**E-mail:** v.pochetuha@mail.ru

**ORCID:** 0000-0003-0492-6188

**Ekaterina S. Vashchuk**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Economic and Natural Sciences, F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch

**E-mail:** vaschuk@bk.ru

**ORCID:** 0000-0002-1345-7419

**SPIN-код:** 9811-5528

**Yurii F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

**E-mail:** yufi55@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-8022-7958

**SPIN-код:** 7576-4810

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 30.10.2023

После доработки 01.07.2024

Принята к публикации 09.07.2024

Received 30.10.2023

Revised 01.07.2024

Accepted 09.07.2024