



РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 549:54.055

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.022



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ (Ag–С)/(МЕДЬ) ПОДЛОЖКА», ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Денис Анатольевич Романов¹, Станислав Владимирович Московский²,
Василий Витальевич Почетуха³, Екатерина Степановна Ващук⁴,
Юрий Федорович Иванов⁵

^{1, 2, 3} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

¹ romanov_da@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6880-2849>

³ v.pochetuha@mail.ru

⁴ филиал Кузбасского государственного технического университета в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия, vaschuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

⁵ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия, yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

Аннотация. Полученная система Ag–С, сформированная на медной подложке, характеризуется высокоразвитой толщиной покрытия от 50 мкм до 550 мкм. В покрытии углеродное 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, либо формирует включения (зерна) субмикроструктурных 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–С/Si выявлено формирование переходного слоя толщиной 250–300 нм. Размер субзерен в переходном слое изменяется в пределах 150–250 нм. Модуль упругости и микротвердость по Виккерсу уменьшаются с увеличением глубины покрытия. Износостойкость покрытия составляет $6 \cdot 10^{-6}$ мм³/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: низкоэнергетичный импульсный электронный пучок, серебро, углеродное волокно, медь, наноразмерные частицы, твердость, модуль упругости, износостойкость.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4292.2022.4. Электровзрывное напыление произведено с использованием оборудования научной лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий – 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: Структура и свойства системы «покрытие (Ag–С)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком / Д. А. Романов [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 166–177. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.022. EDN: <https://elibrary.ru/BUQPKJ>.

Original article

STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SYSTEM "COATING (Ag–C)/(COPPER) SUBSTRATE", IRRADIATED BY A PULSE ELECTRON BEAM

Denis A. Romanov ¹, Stanislav V. Moskovsky ², Vasily V. Pochetuha ³,
Ekaterina S. Vashchuk ⁴, Yury F. Ivanov ⁵

^{1, 2, 3} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

¹ romanov_da@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6880-2849>

³ v.pochetuha@mail.ru,

⁴ Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk branch, Prokopyevsk, Russia, vashchuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

⁵ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISE SB RAS), Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

Abstract. *The resulting Ag-C system formed on a copper substrate is characterized by a highly developed coating thickness from 50 μm to 550 μm . In the coating, carbon-graphite fiber is present in the form of plates. The coating is an aggregate doped with copper atoms. Change the concentration of copper atoms when changing the distance from the surface of the coating 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 has been 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. It is shown that the hardness and Young's modulus decrease with distance from the surface to the interface between the coating and the substrate. It has been established that the coating wear parameter is $6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, which is 12.2 times less than the copper wear parameter. The resulting set of properties and characteristics of the structure allows us to conclude that the coatings formed are suitable for working in electrical contacts of powerful electrical networks. The specific choice of a specific model of contacts requires additional clarifying studies.*

Keywords: *low-energy pulsed electron beam, silver, carbon fiber, copper, nanosized particles, hardness, Young's modulus, wear resistance.*

Acknowledgments: *The study was financially supported by the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - PhDs MK-4292.2022.4. Electroexplosive spraying was carried out using the equipment of a scientific laboratory for electroexplosive spraying of highly reliable coatings, created in accordance with the Decree of the Government of the Kemerovo Region - Kuzbass No. 632 of September 19, 2022, agreement No. Physical Properties of Materials" FGBOU VO "Novosibirsk State Technical University".*

For citation: Romanov, D. A., Moskovsky, S. V., Pochetuha, V. V., Vashchuk, E. S. & Ivanov, Yu. F. (2023). Structure and properties of the system "Coating (Ag–C)/(copper) substrate", irradiated by a pulse electron beam. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 166-177. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.022. EDN: <https://elibrary.ru/BUQPKJ>.

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 электри-

ческой цепи, а также обладать высокими значениями тепло- и электропроводности. Такие требования к материалам реализовываются в композиционных покрытиях. Максимальные значения электропроводимости наблюдаются у сплавов, включающих в состав углерод и медь, золото, серебро, кобальт, алюминий, никель [1, 2] в различных концентрациях.

Электрические контакты на основе сере-

бра с несколькими весовыми процентами углерода в виде графита нашли широкое применение в низковольтной энергетике [3–8]. Однако их недостатком являются сильное прогорание и плохое рассеивание дуги. Поэтому в настоящем исследовании было принята попытка заменить углеграфитовое волокно вместо порошка графита. Углеродное волокно служит каркасом изделия, а в качестве матрицы применяются различные металлы. Самую высокую тепло- и электропроводность имеет серебро, но оно имеет низкую твердость. Как правило, в электрических соединениях должны использоваться контакты из одного и того же материала. Ток, проходящий через контакт серебро-серебро, имеет относительно большую площадь проводимости. Выбранный металл также имеет хорошие характеристики паяемости, а его оксиды обеспечивают проводимость тока. Поэтому серебро может быть подходящим выбором для сочетания с медью [9–10]. Присадка меди увеличивает твердость и понижает его эрозию.

Серебряные сплавы применяются в слабых электромеханических 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, контактах реле в блоках питания, централизации и блокировки на железнодорожном транспорте [1, 2, 8]. Они 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 металлическими навесками упрочняемой поверхности. Для придания детали нужных размеров и требуемого качества поверхности проводят фрезерование и шлифование детали [11, 12, 13].

Другим способом получения композиционных материалов медь–серебро–углерод является порошковая металлургия, при которой порошки различных материалов загружаются в формы, прессуются, а затем спекаются, после чего частицы порошка слипаются за счет взаимной диффузии. После спекания качество поверхности достигается резанием или шлифованием [5, 14, 15].

Наряду с практической значимостью данного композиционного соединения большую роль играет научное исследование полученной структуры. Наибольшую ценность получило образование нанокристаллов, которые обладают повышенными физическими свойствами системы [1, 13–18].

В последние 20 лет развивается метод электровзрывного напыления высоконадежных покрытий, который позволяет формировать покрытия субмикронного и нанометрового диапазона структуры с помощью плазменных струй продуктов взрыва проводников [1, 8, 14, 15]. Дополнительная электронно-пучковая обработка используется в настоящей работе для сглаживания неровностей поверхности покрытия, устранения пор и неоднородностей вместо механической обработки, тем самым позволяет избежать потерь нанесенного материала.

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

МЕТОДЫ

Предметом исследования были электровзрывные покрытия серебро–углерод, сформированные на медных электродах. В итоге электрического взрыва серебряной фольги массой 400 мг и углеграфитового волокна массой 50 мг было создано покрытие на меди при поглощаемой плотности мощности $5,5 \text{ ГВт/м}^2$ на облучаемой поверхности. Давление в ударно-сжатом слое около места обработки составляет $\sim 12,5 \text{ Мпа}$, остаточное давление газа в рабочей камере $\sim 100 \text{ Па}$. Температура оплавления поверхности порядка $\sim 10^4 \text{ К}$. Время плазменного воздействия составляет $\sim 100 \text{ мкс}$. Покрытия напыляли на образцы-мишени из электротехнической меди. Химический состав меди приведен в [1]. После электровзрывного напыления медные образцы-мишени с покрытиями подвергали дополнительному облучению импульсным электронным пучком, характеризующимся энергией ускоренных электронов 18 кэВ , плотностью энергии пучка электронов 60 Дж/см^2 , длительностью импульса – 100 мкс , частотой следования импульсов – $0,3 \text{ с}^{-1}$, числом импульсов – 10. Элементный и фазовый состав проводили на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 Tescan и просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100F, JEOL. Был проведен рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ поверхности на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 в медном отфильтрованном излучении $\text{Cu-K}\alpha_1$; монохроматор CM-3121. Микротвердость измеряли на приборе ТТХ-ННТ S/N: 01-04538.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2023

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ (Ag–C)/(МЕДЬ) ПОДЛОЖКА», ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Методика эксперимента указана в [1]. Также был определен модуль упругости. Износостойкость определяли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester [1]. Профиль канавки износа и ее параметры исследовали контактным нанопрофилометром.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Электронно-микроскопические исследования поперечных травленных шлифов данной системы показало 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 размеров (рис. 1).

Как и следовало ожидать, данные включения являются графитом, для убедительности показано методами микрорентгено-спектрального анализа (метод картирования),

результаты которого приведены на рис. 2. Часто включения графита в системе «покрытие (Ag–C)/(медь) подложка» 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 рисунке 4 и рисунке 5, а также представлены в таблице 1. Анализируя представленные в таблице 1 данные, можно также отметить неоднородное распределение химических элементов в покрытии. Кроме этого, отчетливо видно легирование покрытия атомами меди (подложка). При этом концентрация атомов меди увеличивается по мере удаления от поверхности покрытия.

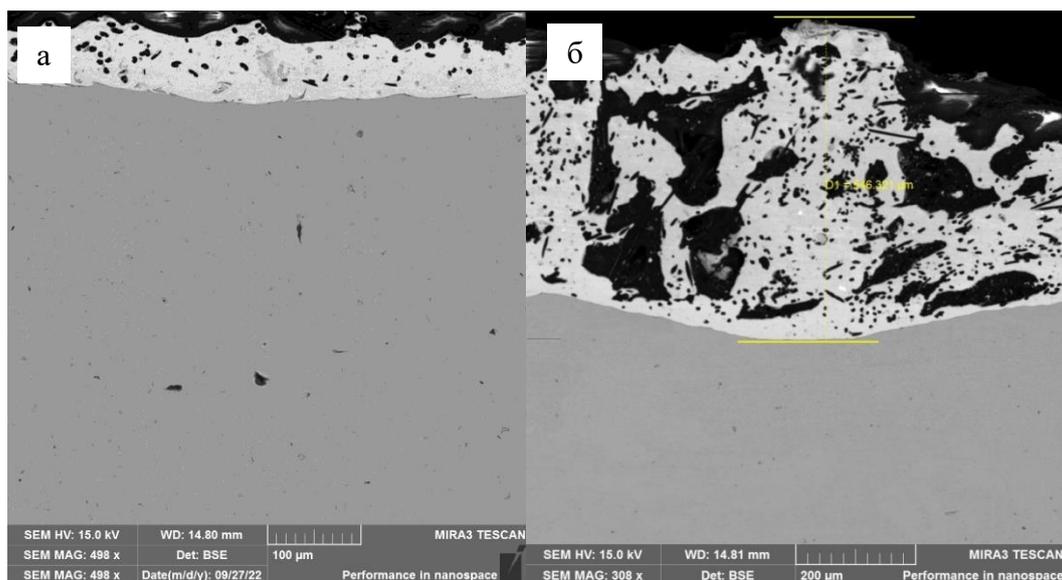


Рисунок 1 – Сканирующая электронная микроскопия поверхности серебро–углерод на медном электроде при увеличении SEM MAG 498x (а) и 308 x (б). Поперечный шлиф

Figure 1 – Scanning electron microscopy of a silver-carbon surface on a copper electrode at SEM MAG 498x (a) and 308x (b) magnification. Crosssection

Таблица 1 – Данные микрорентгеноспектрального количественного анализа элементного состава поверхности серебро–углерод, определенные «по точкам» на рис. 4, а соответственно

Table 1 – The data of the microrentgenospectral quantitative analysis of the elemental composition of the silver-carbon surface, determined "by points" in Fig. 4, and respectively

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

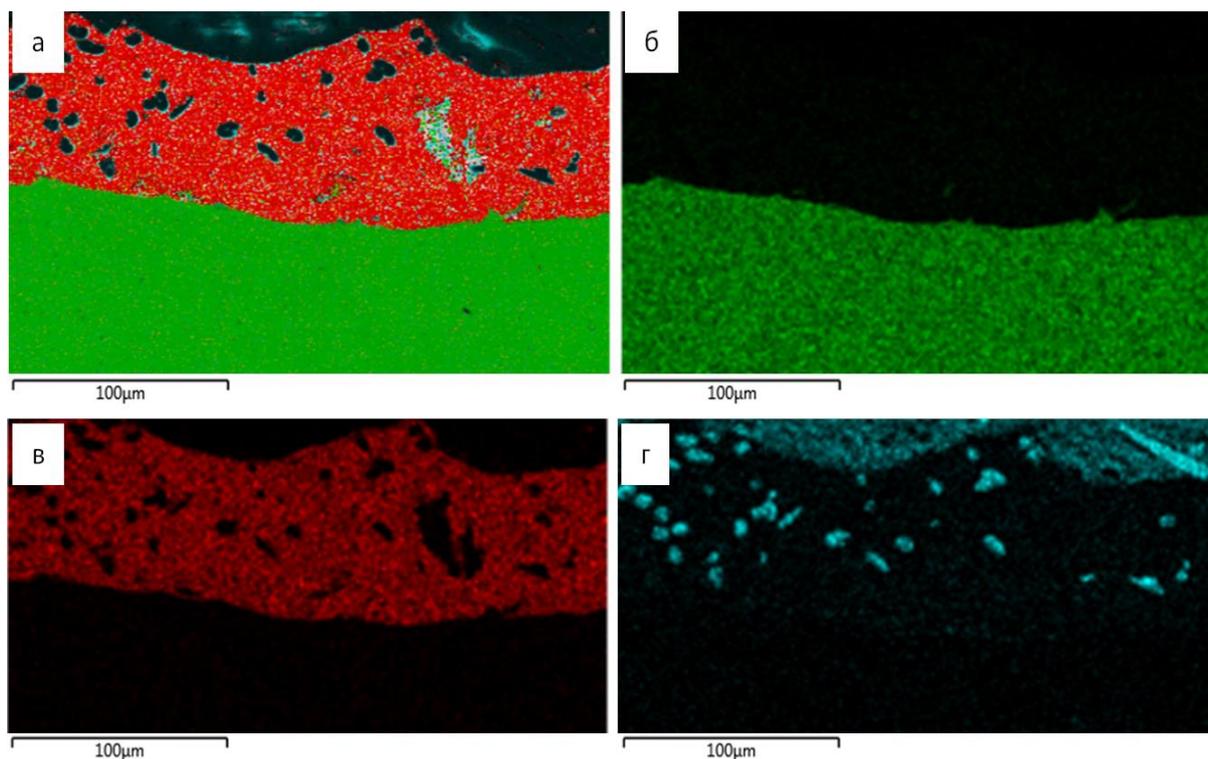


Рисунок 2 – Характеристическое рентгеновское излучение атомов меди (б), серебра (в) и углерода (г); а – многослойная карта ЭДС, полученная наложением изображений (б–г) поверхности серебро-углерод на медном электроде

Figure 2 – Characteristic X-ray radiation of copper atoms (b), silver (c) and carbon (g); a – multilayer EMF map obtained by overlaying images (b–d) silver-carbon surface on a copper electrode

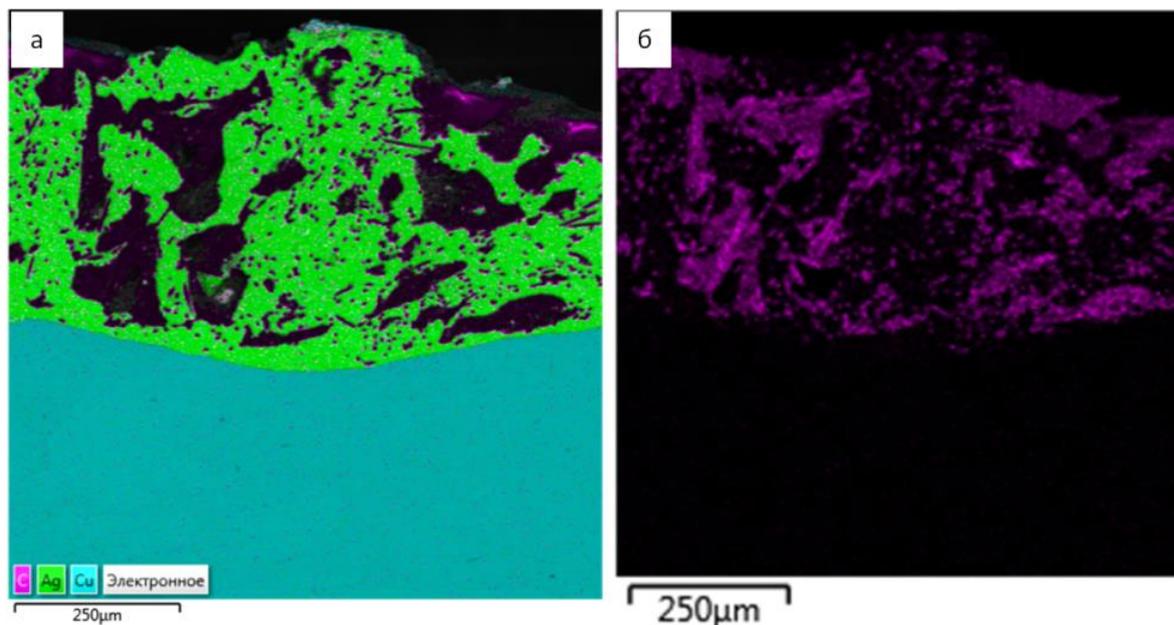


Рисунок 3 – Многослойная карта ЭДС поверхности серебро-углерод (а), соответствующей рентгеновскому излучению атомов углерода (б)

Figure 3 – Multilayer EMF map of the silver-carbon surface (a) corresponding to the X-ray emission of carbon atoms (b)

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ (AG-C)/(МЕДЬ) ПОДЛОЖКА»,
ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОНЫМ ПУЧКОМ

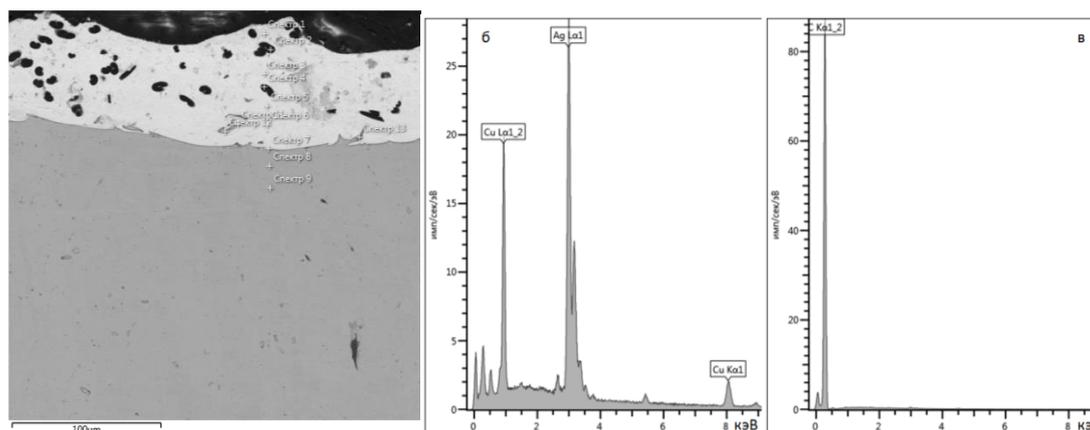


Рисунок 4 – Сканирующая электронная микроскопия поперечного шлифа поверхности серебро–углерод (а); энергетические спектры, полученные с участков № 7 и № 4 (б, в). На (а) обозначены локальные точки образца, в которых проведен микрорентгеноспектральный анализ

Figure 4 – Scanning electron microscopy of the transverse section of the silver-carbon surface (a); energy spectra obtained from sites No. 7 and No. 4 (b, c). Local points of the sample are indicated on (a), in which a microrentgenospectral analysis was performed

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

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

Анализ результатов относительного фазового содержания, представленного в табл. 2, показывает, что параметр кристалли-

ческой решетки и 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 (рисунок 6).

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

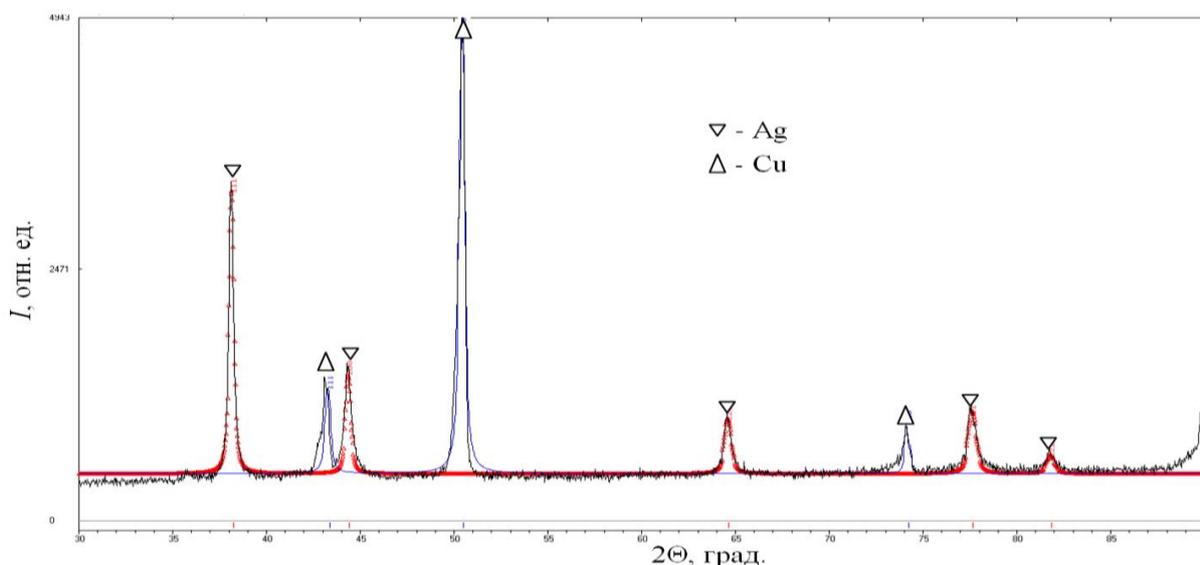


Рисунок 5 – Рентгенограмма поверхности серебро–углерод после облучения электронным пучком

Figure 5 – Radiograph of the silver-carbon surface after electron beam irradiation

Таблица 2 – Данные элементного содержания и параметров кристаллической решетки поверхности серебро–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. %	Параметры решетки, Å	Размер областей когерентного рассеяния, нм	$\Delta d/d, 10^{-3}$
Система «(Ag–C)/(медь)» + электронно-пучковая обработка	Ag	34,4	$a = 4,0743$	63,29	1,507
	Cu	65,6	$a = 3,6106$	34,34	1,032

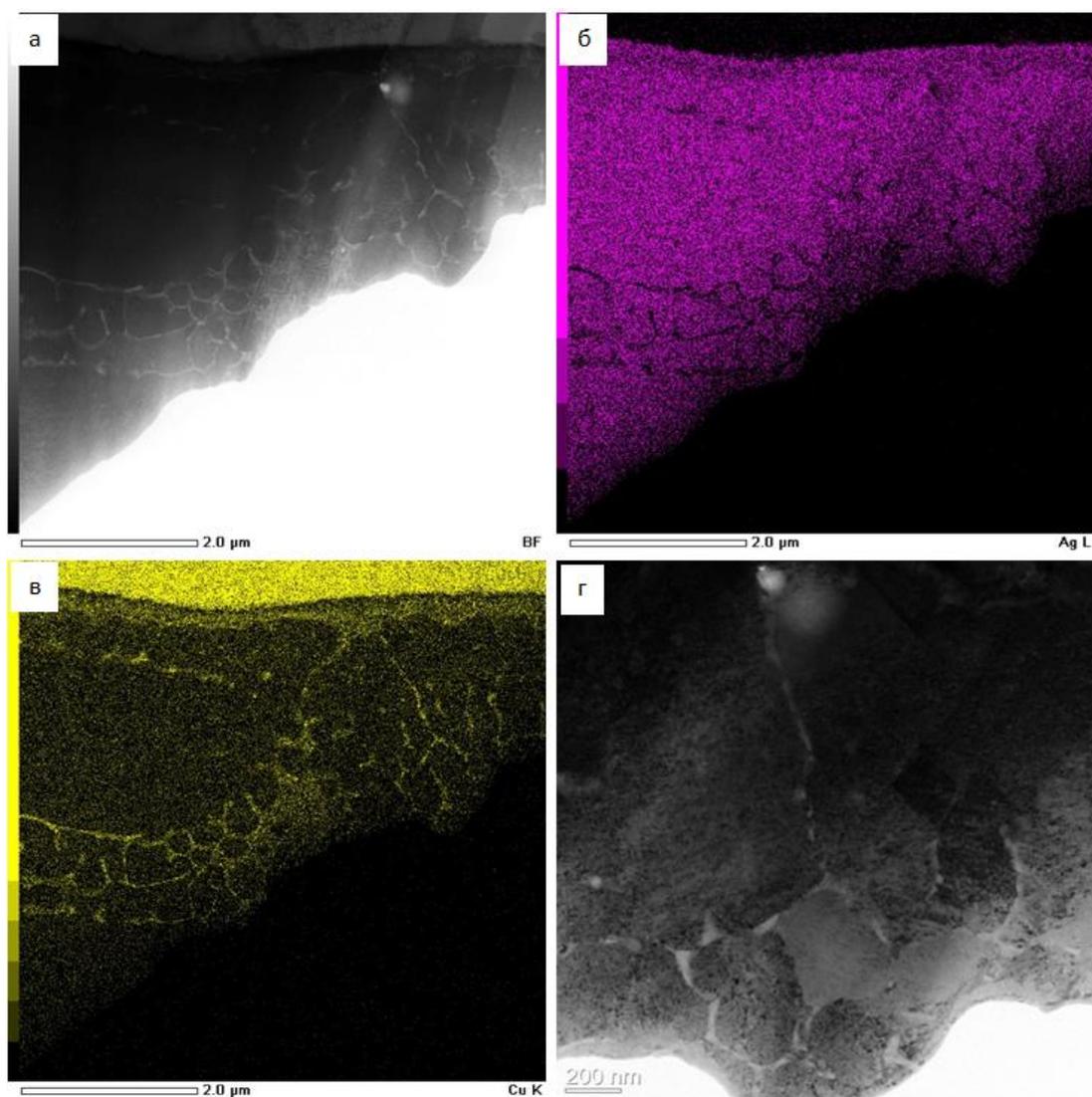


Рисунок 6 – Электронная микроскопия структуры системы серебро–углерод на медной подложке (а, д); б, в – изображения участка фольги (а), полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов серебра (б) и меди (в)

Figure 6 – Electron microscopy of the structure of the silver-carbon system on a copper substrate (a, d); б, в – images of the foil section (a) obtained in the characteristic X-ray radiation of silver (б) and copper (в) atoms

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ (AG-C)/(МЕДЬ) ПОДЛОЖКА»,
ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Анализ микроэлектроннограммы (рис. 7, б) позволяет утверждать, что данный участок покрытия сформирован зернами серебра (рис. 7, в). В объеме зерен серебра присутствуют наноразмерные (10–15 нм) частицы графита (рис. 7, г). Частицы графита присутствуют также и на границах зерен серебра (рис. 7, в, г). На рисунке 8 приведены электронно-микроскопические изображения участ-

ка покрытия, в котором по границам зерен серебра расположены частицы графита (рис. 8, г, 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 рисунке 10.

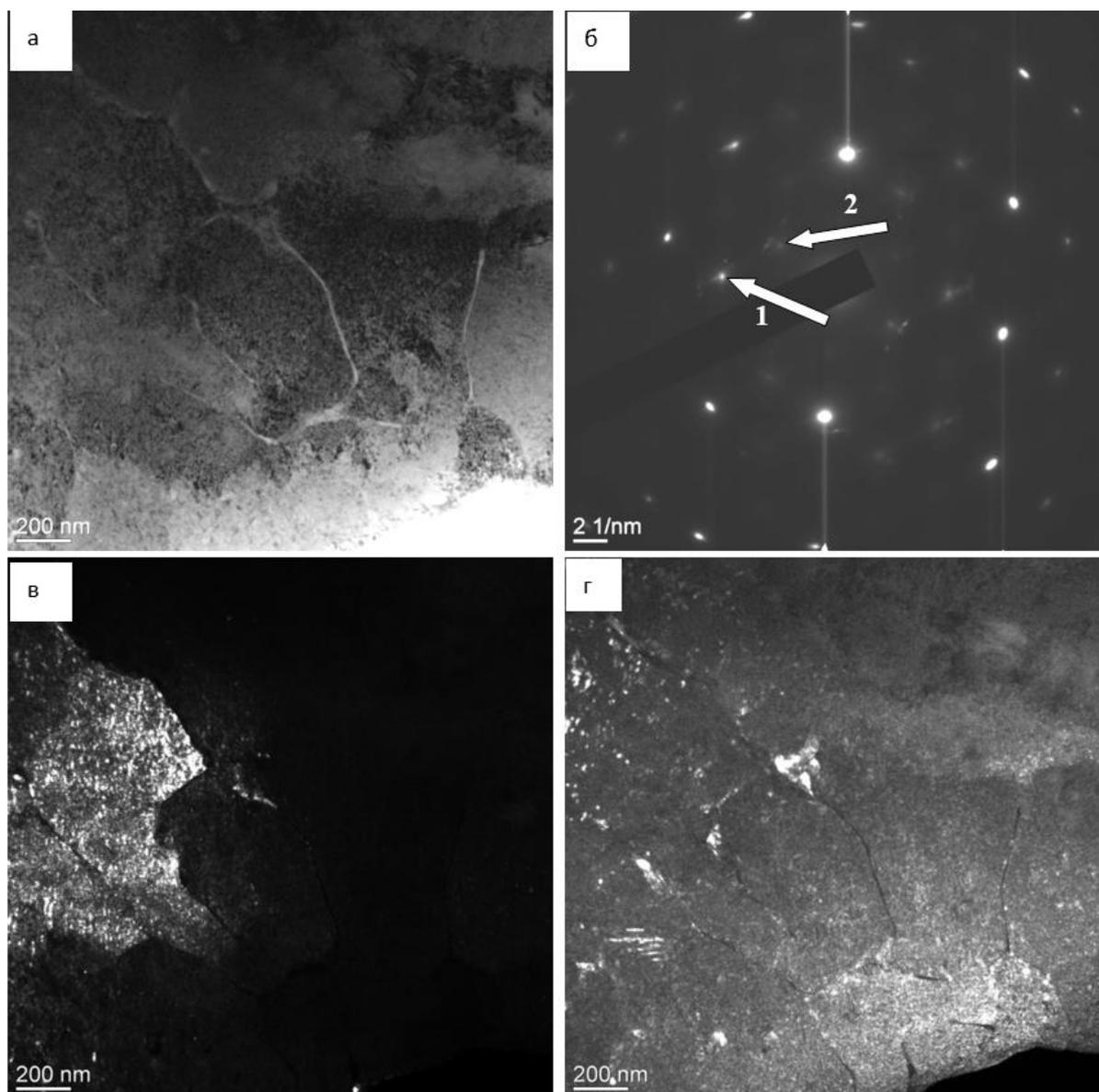


Рисунок 7 – Светлопольное изображение поверхности серебро-углерод на медном электроде (а); микроэлектроннограмма (б); темнопольные изображения (в, г), полученные в рефлексах $[022]Ag + [416]C$ (в) и $[111]Ag + [111]C$ (г). На (б) стрелки показывают рефлексы, в которых получены темнопольные изображения: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

Figure 7 – Light-field image of the silver-carbon surface on a copper electrode (a); micro-electronogram (b); dark-field images (c, d) obtained in reflexes $[022]Ag + [416]C$ (c) and $[111]Ag + [111]C$ (d). On (b) arrows show reflexes in which dark-field images are obtained: 1 - for (c); 2 - for (d). Transmission electron diffraction microscopy

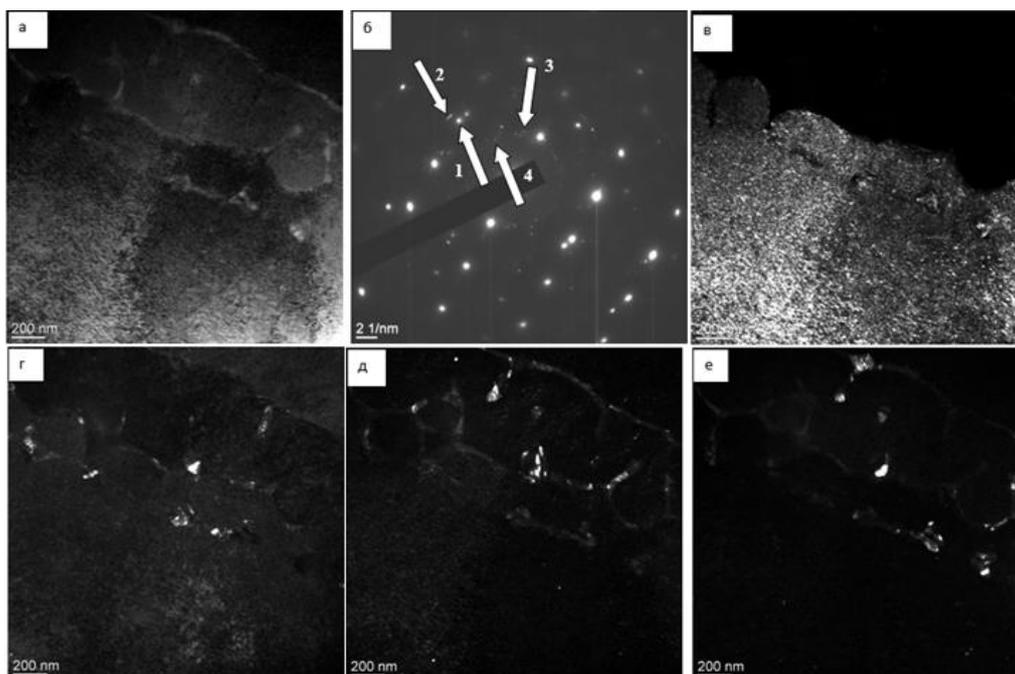


Рисунок 8 – Светлопольное изображение структуры серебро–углерод на медном катоде (а); микроэлектронграмма (б); темнопольные изображения (в–е), полученные в рефлексах [110]C + [311] Ag (в); [112]C (г); [111]Cu (д); [205]C (е). На (б) стрелки показывают рефлексы, в которых получены темнопольные изображения 1 – для (в); 2 – для (г), 3 – для (д), 4 – для (е). Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия

Figure 8 – Light-field image of the silver-carbon structure on a copper cathode (a); microelectronogram (b); dark-field images (c-e) obtained in reflexes [110]C + [311]Ag (c); [112]C (d); [111]Cu (e); [205]C (e). On (b) the arrows show reflexes, in which dark-field images were obtained 1 - for (c); 2 - for (d), 3 - for (e), 4 - for (e). Transmission electron diffraction microscopy

Результаты механических свойств рассматриваемой системы показывают, что твердость и модуль упругости снижаются при удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки (рисунок 9).

Отчетливо видно формирование переходного слоя толщиной 250–300 нм. Слой имеет субзеренное строение с размером субзерен, изменяющимся в пределах от 150 до 250 нм (рис. 10, г–е). Фазовый состав переходного слоя представлен медью, серебром и графитом.

Трибологические свойства данной системы после обработки электронным пучком характеризуются параметром износа поверхности, равным $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, который меньше в 12,2 раза параметра износа основы. Коэффициент трения поверхностных слоев равен 0,3 и равен коэффициенту трения основы.

Таким образом, на основании данных фазового состава и структуры поверхности кратное увеличение твердости полученного слоя и износостойкости покрытия можно соотнести с формированием субмикро- нанокристаллической

многофазной структуры вследствие облучения покрытия импульсным электронным пучком.

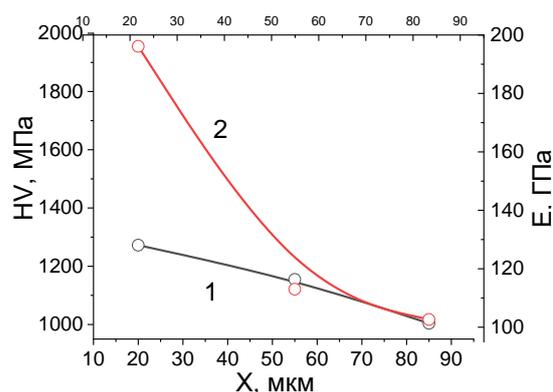


Рисунок 9 – Зависимости твердости (кривая 1) и модуля упругости (кривая 2) от расстояния от поверхности покрытия, облученного импульсным электронным пучком

Figure 9 – Dependences of hardness (curve 1) and Young's modulus (curve 2) on the distance from the surface of the coating irradiated with a pulsed electron beam

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ (АГ–С)/(МЕДЬ) ПОДЛОЖКА»,
ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

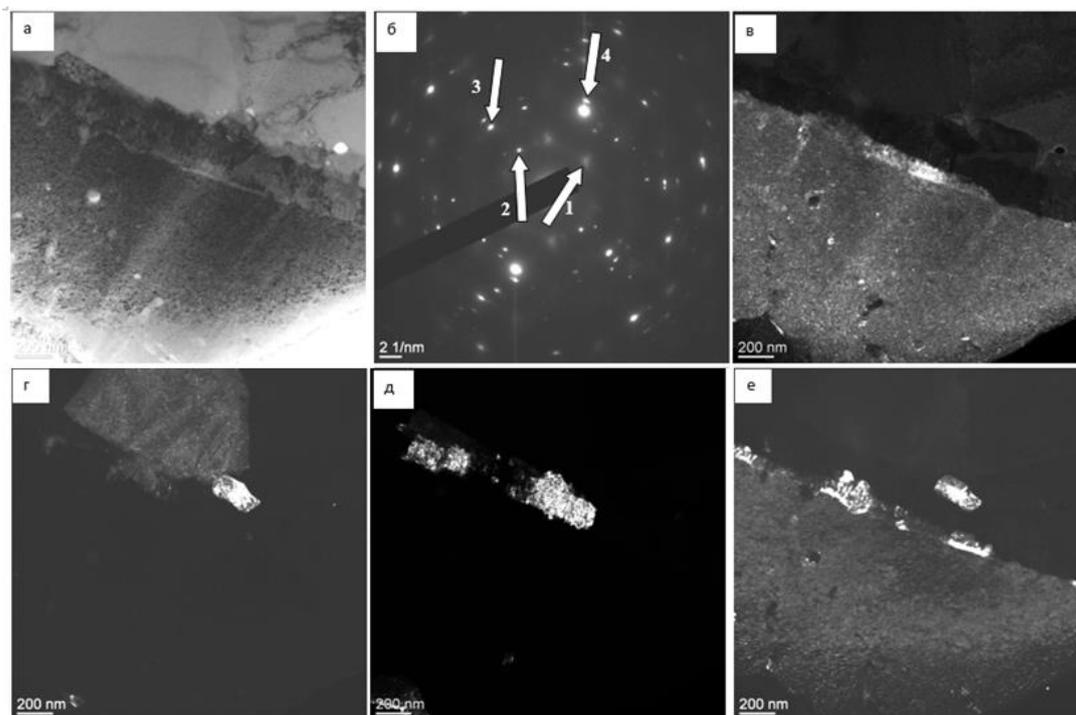


Рисунок 9 – Светлопольное изображение системы серебро–углерод на медном электроде (а); микроэлектронграмма (б); темнопольные изображения (в–е), полученные в рефлексах [111]Ag + [213]C (в), [111]Cu + [111]C (г), [311]Ag + [110]C (д) и [200]Cu + [006]C (е).

На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темнопольные изображения:

1 – для (в); 2 – для (г), 3 – для (д), 4 – для (е).

Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия

Figure 9 – Brightfield image of a silver-carbon system on a copper electrode (a); microelectronogram (b); dark-field images (c-f) obtained in reflexes

[111]Ag + [213]C (c), [111]Cu + [111]C (d), [311]Ag + [110]C (e) and [200]Cu + [006]C (f).

In (b) the arrows indicate the reflections in which dark-field images were obtained:

1 - for (c); 2 - for (d), 3 - for (e), 4 - for (f).

Transmission electron diffraction microscopy

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что формируется неоднородное по структуре покрытие Ag–C толщиной 50 до 550 нм. В данном покрытии графит представлен пластинчатой формой и в виде скоплений разнообразной формы и размеров. Также данное покрытие насыщается атомами меди, концентрация которых увеличивается по глубине обработки. Исследования рентгенофазового анализа показали образование твердого раствора меди и серебра, графит не был выявлен. Анализ тонких фольг установил, что медь в покрытии располагается в виде тонких прослоек по границам зерен серебра, либо формирует включения (зерна) субмикронных 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 результате обработки формируется переходный слой между покрытием и основой толщиной 250–

300 нм, который имеет субзеренное строение с размерами субзерен от 150 до 250 нм. Наблюдается уменьшение микротвердости и модуля упругости по глубине покрытия. Параметр износа покрытия составляет $6 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н·м, что в 12,2 раз меньше параметра износа основы. Коэффициент трения покрытия и основы совпадают, и равны 0,3. Увеличение твердости и износостойкости поверхностного слоя связано с формированием субмикро- нанокристаллической многофазной структуры вследствие облучения покрытия импульсным электронным пучком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование структуры и свойств электро-взрывных электроэрозсионностойких покрытий на медных контактах переключателей мощных электрических сетей : монография / В.В. Почетуа [и др.]. Новокузнецк : ООО Полиграфист, 2023. 257 с.
2. Материал для электрических контактов и способ изготовления электрических контактов: пат. 2380781 С1 Рос. Федерация № 2008139279/09; заявл.

03.10.2008; опублик. 27.01.2010 / В.С. Аркатов, В.В. Васин, Е.Н. Емельянов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "НТЦ Информационные Технологии".

3. Luo G., Li P., Hu J., Guo J., Sun Y. & Shen Q. (2022). Ag and C addition into Al–Cu matrix composites. *Journal of Materials Science*, (57), 11013–11025.

4. Sytshev A.E., Vadchenko S.G., Busurina M.L., Boyarchenko O.D. & Karpov A.V. (2022). High-Temperature Interaction between Carbon Fibers and Cu–Ag Eutectic Alloy. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, (31), 188–194.

5. Wang J., Hu D., Zhu Y. and Guo P. (2022). Electrical Properties of In Situ Synthesized Ag-Graphene/Ni Composites. *Materials*, (15(18)), 6423. <https://doi.org/10.3390/ma15186423>.

6. Songsong Li, Hao Yu., Chen X., Andrew A., Gewirth Jeffrey, S. Moore and Charles M., Schroede. (2020). Covalent Ag–C Bonding Contacts from Unprotected Terminal Acetylenes for Molecular Junctions. *Nano Letters*, (20, 7), 5490–5495.

7. Fernández S., Molinero A., Sanz D., González J.P., Cruz M., Gandía J.J. and Cárabe J. (2020). Graphene-Based Contacts for Optoelectronic Devices Micro-machine, (11(10)), 919; <https://doi.org/10.3390/mi11100919>.

8. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosniin K.V., Moskovskii S.V., Gromov V.E., Bataev V.A., Ivanov Yu.F., Semin A.P. (2022). 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*. (19), 947–966.

9. Gaurav A.K., Chang Y., Wojciech T. Osowiecki, Moreno-Hernandez I.A., Ledendecker M. and Alivisatos A.P. (2020). Self-Limiting Shell Formation in Cu@Ag Core–Shell Nanocrystals during Galvanic Replacement. *Cite this: J. Phys. Chem. Lett.* (11, 13), 5318–5323. DOI : 10.1021/acs.jpcclett.0c01551.

10. ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСПЛАВАХ Cu–Ag / Н.И. Непша [и др.] // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14, 211–226.

11. Mousavi Z., Pourabdoli M. (2022). 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*. (290), 126608.

12. Aikun L., Ming X., Yang Y., Zhang J., Wang S., Chen Y., Zhou W. (2022). Effect of CNTs content on the mechanical and arc-erosion performance of Ag–CNTs composites. *Diamond and Related Materials Volume* (128), 109211.

13. Yakout M., Elbestawi M., Veldhuis S.C. (2018). A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena* (278), 1–14, DOI : 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. (2022). Structure and Properties of Multi-Layer Films of High-Entropy Metals Deposited by the Ion-Plasma Method. *Russian Physics Journal* (64), 2207–2213.

15. Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. (2022). Анализ совре-

менной ситуации в области применения электронно-лучевой обработки различных сплавов. Часть 2, *Ползуновский вестник*, (3), 204–215. doi : 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028.

16. Chen S., Wang J., Yuan Z., Wang Z., Du D. (2021). Microstructure and arc erosion behaviors of Ag–CuO contact material prepared by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* (860), 158494, doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158494.

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

18. Dynamics Evolution and Mechanical Properties of the Erosion Process of Ag–CuO Contact Materials MA Minjing, QU Yinhu, WANG Zhe, WANG Jun, DU Dan. *Acta Metall Sin* 2022, Vol. 58 Issue (10): 1305–1315. DOI : 10.11900/0412.1961.2021.00498.

19. Шухардин С.В. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. Москва : Наука, 1979. 248 с.

20. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Москва : Машиностроение, 1996–2000. 448 с.

Информация об авторах

Д. А. Романов – доктор технических наук, доцент, заведующий научной лабораторией электровзрывного напыления высоконадежных покрытий Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Московский – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий Сибирского государственного индустриального университета.

В. В. Почетуха – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспорта и логистики» Сибирского государственного индустриального университета.

Е. С. Ващук – кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественно-научных дисциплин» Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева, филиал в городе Прокопьевске.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник «Лаборатории плазменной эмиссионной электроники» Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

REFERENCES

1. Pochetukha, V.V., Romanov, D.A., Gromov, V.E., Filyakov, A.D. (2023). Formation of the structure and properties of electro-explosive electro-erosion-resistant coatings on copper contacts of switches of powerful electrical networks: monograph. Novokuznetsk : Polygraphist LLC, 2023. 257 p. (In Russ.).

2. Arkatov, V.S., Vasin, V.V., Emelyanov, E.N., Konakov, A.V., Fadeev, V.S., Shtanov, Yu.L., Shtanov, O.V. and Nikonov, A.V., Mikushkin, S.N., Minakov, V.S. (2008). Material for electrical contacts and a method for manufacturing electrical contacts: Pat. 2380781 C1 Ros. Federation No.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2023

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ (AG-C)/(МЕДЬ) ПОДЛОЖКА», ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

2008139279/09; publ. 01/27/2010; applicant Limited Liability Company "NTC Information Technologies" (In Russ.).

3. Luo, G., Li, P., Hu, J., Guo, J., Sun, Y. & Shen, Q. (2022). Ag and C addition into Al-Cu matrix composites. *Journal of Materials Science*, (57), 11013-11025.

4. Sytshev, A.E. Vadchenko, S.G. Busurina, M.L., Boyarchenko, O.D. & Karpov, A.V. (2022). High-Temperature Interaction between Carbon Fibers and Cu-Ag Eutectic Alloy. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, (31), 188-194.

5. Wang, J., Hu, D., Zhu, Y. and Guo, P. (2022). Electrical Properties of In Situ Synthesized Ag-Graphene/Ni Composites. *Materials*, (15(18)), 6423, <https://doi.org/10.3390/ma15186423>.

6. Songsong, Li, Hao, Yu., Chen, X., Andrew, A., Gewirth, Jeffrey, S. Moore and Charles, M., Schroede. (2020). Covalent Ag-C Bonding Contacts from Unprotected Terminal Acetylenes for Molecular Junctions. *Nano Letters*, (20, 7), 5490-5495.

7. Fernández, S., Molinero, A., Sanz, D., González, J.P., Cruz, M., Gandía, J.J. and Cárabe, J. (2020). Graphene-Based Contacts for Optoelectronic Devices Micromachine, (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. (2022). 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*. (19), 947-966.

9. Gaurav, A.K., Chang, Y., Wojciech, T. Osowiecki, Moreno-Hernandez, I.A., Ledendecker, M. and Alivisatos A.P. (2020). Self-Limiting Shell Formation in Cu@Ag Core-Shell Nanocrystals during Galvanic Replacement. Cite this: *J. Phys. Chem. Lett.* (11, 13), 5318-5323. DOI : 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. (2022). VARIABILITY OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN Cu-Ag BIMETALLIC NANOALLOYS. Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials, (14), 211-226. (In Russ.).

11. Mousavi, Z., Pourabdoli, M. (2022). 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*. (290), 126608.

12. Aikun, L., Ming, X., Yang, Y., Zhang, J., Wang, S., Chen, Y., Zhou, W. (2022). Effect of CNTs content on the mechanical and arc-erosion performance of Ag-CNT composites. *Diamond and Related Materials* Volume (128), 109211.

13. Yakout, M., Elbestawi, M., Veldhuis, S.C., (2018). A Review of Metal Additive Manufacturing

Technologies. *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena* (278), 1-14, DOI : 10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1.

14. Ivanov, Yu.F., Koval, N.N., Akhmadev, Yu.H., Uglov, V.V., Shugurov, V.V., Petrikova, E.A., Krysina, O.V., Prokopenko, N.A. & Azhazha, I.I. (2022). Structure and Properties of Multi-Layer Films of High-Entropy Metals Deposited by the Ion-Plasma Method. *Russian Physics Journal* (64), 2207-2213.

15. Komarov, D.V., Kononov, S.V., Zhukov, D.V., Vinogradov, I.S., Panchenko, I.A. (2022). Analysis of the current situation in the field of application of electron-beam processing of various alloys. Part 2, *Polzunovskiy Bulletin*, (3), 204-215. doi : 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028.

16. Chen, S., Wang, J., Yuan, Z., Wang, Z., Du, D. (2021). Microstructure and arc erosion behaviors of Ag-CuO contact material prepared by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* (860), 158494, doi : org/10.1016/j.jallcom.2020.158494.

17. Based Electrical Contact Material Under Direct Current Hangyu Li, Xianhui Wang, Zhudong Hu & Yanfeng Liu. *Journal of Electronic Materials* volume 49, P. 4730-4740. (2020).

18. Dynamics Evolution and Mechanical Properties of the Erosion Process of Ag-CuO Contact Materials MA Minjing, QU Yinhu, WANG Zhe, WANG Jun, DU Dan. *Acta Metall Sin* 2022, Vol. 58 Issue (10): 1305-1315. DOI : 10.11900/0412.1961.2021.00498.

19. Shukhardin, S.V. (1979). Binary and multi-component systems based on copper. Moscow : Nauka, 248 p.

20. Lyakishev, N.P. (1996-2000). Diagrams of the state of binary metallic systems. Moscow : Mashinostroenie, 448 p.

Information about the authors

D. A. Romanov - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Scientific Laboratory of Electroexplosive Spraying of Highly Reliable Coatings, Siberian State Industrial University.

S. V. Moskovsky - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Scientific Laboratory of Electroexplosive Spraying of Highly Reliable Coatings, Siberian State Industrial University.

V. V. Pochetukha - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University.

E. S. Vashchuk - Candidate of Technical Sciences, associate Professor of the Department of "Natural Science Disciplines" T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk branch.

Yu. F. Ivanov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of the "Laboratory of Plasma Emission Electronics" of the Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISE SB RAS).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2023; одобрена после рецензирования 18 сентября 2023; принята к публикации 20 ноября 2023.

The article was received by the editorial board on 26 Mar 2023; approved after editing on 18 Sep 2023; accepted for publication on 20 Nov 2023.