

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 621.793.79

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.006

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ TiB_2 -Ag, НАНЕСЕННЫХ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

**Василий Витальевич Почетуха¹, Артем Дмитриевич Филяков^{2†},
Денис Анатольевич Романов³, Екатерина Степановна Вашук⁴, Виктор Евгеньевич Громов⁵**

^{1, 2, 3, 5} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

⁴ Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, ул. Ноградская, 19А, 653039, Прокопьевск, Россия

¹ v.pochetuha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0492-6188>

² filyakov.1999@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-8168-8809>

³ romanov_da@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6880-2849>

⁴ vaschuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

⁵ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

Аннотация. В настоящем исследовании продемонстрировано влияние электронно-пучковой обработкой на структуру и фазовый состав композиционного покрытия с металлической матрицей системы TiB_2 -Ag, нанесенное по средствам электрического взрыва. Фазовый состав и структура покрытий были исследованы при помощи методов рентгеноструктурного анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Фазовый состав покрытий, полученных электровзрывным методом, варьируется от образца к образцу. Воздействие электронно-пучковой обработки привело фазовый состав покрытий к единообразию. Основными фазами после модификации покрытия электронным пучком являются Ag, TiB_2 и B_2O . Увеличение плотности энергии и длительности импульса приводит к уменьшению содержания легкоплавкой фазы Ag и образованию медьсодержащих фаз за счет нагрева и плавления медной подложки избыточной энергией электронного пучка. Структура покрытия представлена серебряной матрицей с включениями в виде частиц TiB_2 . Влияние электронно-пучковой обработки на структуру покрытия носит слабвыраженный характер. Однако под действием электронного пучка микроструктура покрытия трансформировалась в ячеистую кристаллизационную структуру. Наноструктура серебряной матрицы была преобразована в нанокристаллическую структуру со средним размером кристаллов от десятков до сотен нанометров.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, электронно-пучковая обработка, микроструктура, фазовый состав, серебро, диборид титана, композит с металлической матрицей.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>. Выражаем благодарность д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванову и д.ф.-м.н. И.Ю. Литовченко за обсуждение результатов.

Для цитирования: Почетуха В.В., Филяков А.Д., Романов Д.А., Вашук Е.С., Громов В.Е. Структура и фазовый состав покрытий системы TiB_2 -Ag, нанесенных электровзрывным методом и модифицированных электронно-пучковой обработкой // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2024. Т. 21, № 4. С. 456–466. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.006.

Original article

STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF THE TiB_2 -Ag COATING SPRAYED BY ELECTRICAL EXPLOSION METHOD AND MODIFIED BY ELECTRON BEAM TREATMENT

Vasiliy V. Pochetukha¹, Artem D. Filyakov^{2†}, Denis A. Romanov³, Ekaterina S. Vasyuk⁴, Viktor E. Gromov⁵

^{1,2,3,5} Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654006, Russia

⁴ Branch of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev in Prokopyevsk, Nogradskaya Str., 19A, Prokopyevsk, 653039, Russia

¹ v.pochetuha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0492-6188>

² filyakov.1999@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-8168-8809>

³ romanov_da@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6880-2849>

⁴ vaschuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

⁵ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

Abstract. In the present study, the influence of the electron beam treatment on the structure and phase composition of the metal matrix composite TiB_2 -Ag coating sprayed by electrical explosion was demonstrated. Coating's phase composition and structure were investigated by XDR, SEM, and TEM methods. The phase composition of the coating sprayed by electrical explosion varies from sample to sample. The impact of electron beam treatment led to uniformity of the coatings' phase composition. The main phases in the modified coating were Ag, TiB_2 , B_2O . Increasing the pulse energy density and duration leads to the reduction of the low-melting Ag phase and the formation of copper contact phases due to heating and melting of the copper substrate by excess electron beam energy. The coating structure consists of a silver matrix and TiB_2 inclusions. The electron beam treatment had little effect on the structure; however, the microstructure of the coating transformed into a cellular crystallization structure. The silver matrix nanostructure was trans-formed into a nanocrystalline structure with an average crystal size ranging from tens to hundreds of nanometers.

Keywords: electroexplosive spraying, electron beam processing, microstructure, phase composition, silver, titanium diboride, metal matrix composite.

Acknowledgements: Research is funded by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>. We express our gratitude to Doctor of Physical and Mathematical Sciences Yu.F. Ivanov and Doctor of Physical and Mathematical Sciences I.Yu. Litovchenko for the results discussion.

For citation: Pochetukha, V. V., Filyakov, A. D., Romanov, D. A., Vashchuk, E. S. & Gromov, V. E. (2024). Structure and phase composition of the TiB_2 -Ag coating sprayed by electrical explosion method and modified by electron beam treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(4), 456–466. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.006.

Введение

Ключевым элементом безопасности систем энергоснабжения являются подвижные электрические контакты [1]. Для обеспечения бесперебойной работы электрических сетей электроконтактные материалы должны сочетать высокую электропроводность, теплопроводность, твердость и сопротивляемость окислению. Примером таких материалов являются композиционные материалы на основе серебра, применяемые в низковольтных переключателях [2]. В чистом виде серебро обладает относительно высокой тепло- и электропроводностью, но имеет низкую стойкость к эрозии и механические свойства [3]. Добавление к серебру раз-

личных материалов позволяет нивелировать недостатки чистого материала [1]. В отличие от сплавов, в композитах с металлической матрицей растворимость серебра в упрочняющей (вторичной) фазе отсутствует или сильно ограничена. В результате отдельные фазы сохраняют свои тепловые и электрические свойства [4]. Серебряная матрица в таких материалах обеспечивает тепло- и электропроводность, а упрочняющая фаза улучшает механические свойства и увеличивает сопротивляемость свариваемости и эрозионную стойкость [5].

Благодаря сочетанию низкой стоимости и высоких эксплуатационных характеристик широкое распространение получили электроконтактные композитные материалы системы

CdO–Ag [6, 7]. Однако из-за повышенной опасности оксида кадмия для человеческого здоровья и окружающей среды европейское экологическое законодательство ограничило его применение [8].

Перспективным является развитие и разработка серебряных электроконтактных материалов с добавлением диборида титана. TiB_2 обладает высокой температурой плавления (более 2900 °С), высокой твердостью (30 ГПа) и самым низким удельным сопротивлением среди сверхтвердых керамик ($9 \text{ мкОм} \cdot \text{см}^2$) [9].

Для создания покрытий на основе серебра с диборидом титана на медных контактах может применяться метод электровзрывного напыления, являющийся разновидностью плазменного напыления. При данном подходе нанесение покрытий осуществляется за счет быстрого нагрева и взрыва проводника под действием больших токов. В результате создается динамическая ударная волна, которая распыляет продукты электрического взрыва на поверхность образца, создавая покрытие [10, 11]. Рассматриваемый метод имеет ряд ограничений и недостатков. Металлический проводник должен быть изготовлен из тонкой фольги, проволоки или мелкодисперсного порошка для быстрого нагрева и взрыва. Для получения композиционных покрытий методом электровзрывного напыления требуются составные проводники большей толщины, состоящие из нескольких слоев фольги и порошка. Увеличение толщины проводника приводит к недостаточному нагреву, несинхронному взрыву, в результате которого образуются крупные твердые частицы разного размера [12], вызывающие нестабильность структуры и свойств покрытий. Для го-

могенизации структуры и свойств получаемых покрытий может использоваться обработка импульсными электронными пучками.

На основании изложенных выше тезисов, целью настоящей работы являлось выявление изменений структуры и фазового состава, вызванных электронно-пучковой обработкой покрытия TiB_2 –Ag, полученного методом электровзрывного напыления.

Материал и методика исследований

Электровзрывное напыление производили при помощи электровзрывной установки ЭВУ 60/10 М. Конструктивно она состоит из зарядного устройства, емкостного накопителя энергии и плазменного ускорителя, конструкция которой описана в работе [13].

Электрический взрыв обеспечивал плотность мощности при тепловом воздействии на облучаемую поверхность $5,5 \text{ ГВт/м}^2$, давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности $\sim 12,5 \text{ МПа}$, давление остаточных газов в рабочей камере $\sim 100 \text{ Па}$, температура плазмы на срезе сопла $\sim 10^4 \text{ К}$ и длительность импульса $\sim 100 \text{ мкс}$.

Композиционный электроразрывной проводник состоял из серебряной фольги (химический состав, масс. % Ag 99,9; Pb 0,003; Fe 0,035; Sb 0,002; Bi 0,002; Cu 0,058), в центральную часть которой помещался порошок TiB_2 массой 200 мг.

После чего образцы подвергали воздействию импульсного электронного пучка на установке «Соло» [11]. Основные режимы электронно-пучковой обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы электронно-пучковой обработки

Table 1. Electron beam treatment modes

Режим, №	Плотность энергии пучка, Дж/см ²	Длительность пучка, мкс	Число импульсов	Частота импульсов, с ⁻¹
1	45	50	30	0,3
2	50	200	30	0,3
3	60	200	30	0,3
4	70	200	30	0,3

Структуру и элементный состав покрытия изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (КУКУ-ЕМ6900). Исследование элементного состава проводили методом энер-

годисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Исследование образцов методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) после электровзрывного напыления проводилось

на расстоянии 200-1000 нм от поверхности. Образцы после электронно-пучковой обработки исследовали на расстоянии 200 нм – 23,5 мкм от поверхности методами дифракционной просвечивающей (JEM-2100F JEOL) электронной микроскопии.

Рентгенографическое исследование осуществлялось на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н, оснащенный параболическим зеркалом на первичном пучке и позиционно-чувствительным детектором Mythen 2R 1D (640 каналов, размер одного стрипа – 50 мкм). Ускоряющее напряжение, подаваемое на рентгеновскую трубку, составляло 40 кВ, ток – 20 мА. Съемки осуществлялись без вращения образца. Во всех случаях угловой диапазон по 2θ составлял 10-140°. Идентификация фазового

состава, качественный и количественный фазовый анализ выполнены при помощи программного комплекса «КДА – Кристаллография и дифракционный анализ» со встроенной картой порошковых стандартов (АО ИЦ «Буревестник», версия 2023-01-24-144022.8dec10c0f).

Экспериментальные результаты

На рисунке 1 продемонстрированы результаты рентгенографического исследования. Были обнаружены рефлексы, соответствующие фазам Cu_2O 224, Ag 166, TiB 216, Ag 225, Cu_4Ti_3 139, Cu 225, AgTi 129, B_2O_3 144, B_2O 164. Стоит отметить, что фазовый состав различен для каждого образца.

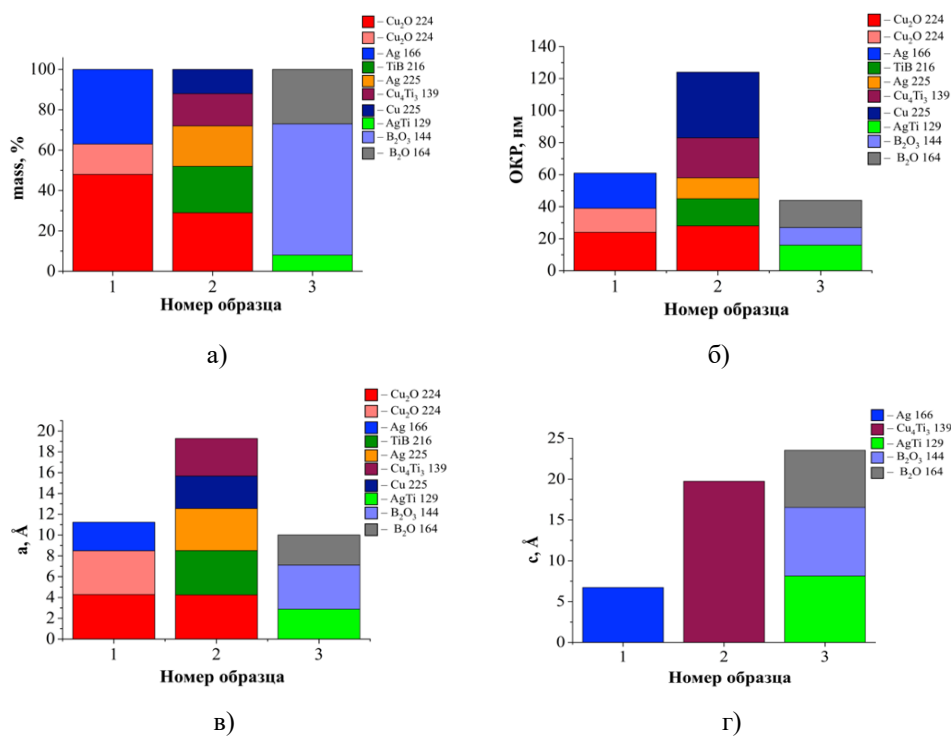


Рис.1. Параметры фаз, обнаруженных в покрытиях системы TiB_2 -Ag, полученных электровзрывным напылением: (а) массовые доли; (б) ОКР; (в) параметр кристаллической решетки a ; (г) параметр кристаллической решетки c

Fig.1. Parameters of the phases formed in the TiB_2 -Ag coating obtained by electrical explosion: (a) mass fraction of phases; (b) CSR; (c) crystal lattice parameter a ; (d) crystal lattice parameter c

На рисунке 2 показана структура поперечного сечения и элементный состав покрытия TiB_2 -Ag, нанесенного электровзрывным методом на медную подложку. Покрытие представляет собой серебряную матрицу с хаотично расположенными включениями TiB_2 . Средняя толщина покрытия составляет 100 мкм. Средний размер частиц колеблется в пределах от

3,64 до 3,44 мкм, что соответствует дисперсности порошка, применяемого при электровзрывном напылении. Крупные включения размером 10-15 мкм, обнаруженные в серебряной матрице, формируются из групп сплавившихся частиц TiB_2 в количестве от 2 до 5 единиц. Кластеры со средним размером более 30 мкм представляют собой агломерацию крупных включе-

ний и отдельных частиц. В объеме покрытия наблюдаются поры, средний размер которых составляет 3,5 мкм. Они возникли в результате выкрашивания частиц TiB_2 при подготовки поперечных шлифов.

Микроструктура серебряной матрицы показана на рисунке 2г. В ней наблюдается мно-

жество пор со средним размером 0,36 мкм, образовавшиеся в результате неравновесных условий кристаллизации [14, 15]. В областях с пониженной растворимостью газа и скоростью охлаждения некоторые поры консолидировались в более крупные с размером до 2 мкм.

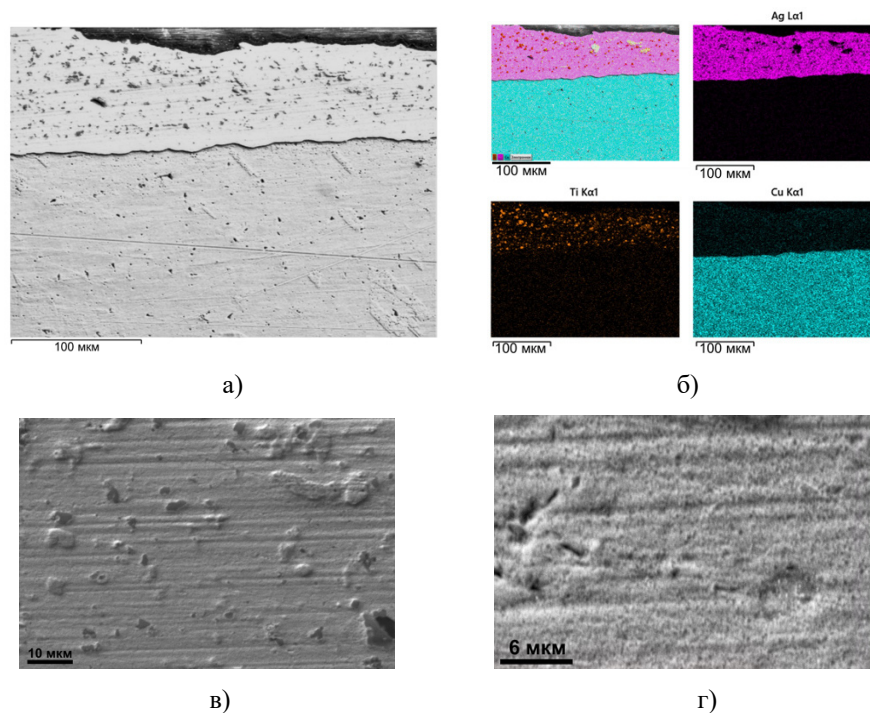


Рис.2. СЭМ изображения структуры покрытия системы TiB_2 -Ag, нанесенного электровзрывным методом, и медной подложки (а); карты распределения атомов Ag, Ti и Cu, полученные с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (б); серебряная матрица с включениями TiB_2 (в); микроструктура серебряной матрицы, полученная при электровзрывном напылении (г)

Fig.2. SEM micrograph of the electrical-explosion-sprayed TiB_2 -Ag coating and copper substrate cross-section morphology (a); EDS element map images of Ag, Ti, and Cu (b); (b) silver matrix with TiB_2 inclusions (c); silver matrix microstructure obtained by electrical explosion spraying (e)

На рисунке 3 представлены светлопольные ПЭМ изображения и соответствующие карты распределения элементов слоя покрытия, расположенного на расстоянии 200-1000 нм от поверхности. Наноструктура покрытия состоит из слоев серебряной матрицы толщиной от 450 до 600 нм. В слое I присутствует включение в виде частицы TiB_2 с оплавленными границами. Также в слоях I и II были обнаружены полосы Ti и атомы B, концентрация которых увеличилась к слою III. Из полученных данных следует, что частицы TiB_2 могут при электровзрывном напылении как оставаться стабильным в серебряной матрице, так и взаимодействовать с серебром с образованием новых соединений.

Значительные различия в фазовом составе полученных покрытий вызваны физическими закономерностями формирования покрытий при электровзрывном напылении. В данном процессе проводник, состоящий из фольги и порошка, нагревается и взрывается, в результате чего образуется множество частиц разного размера, находящихся в разном фазовом состоянии. Они сопровождаются ударной волной, возникшей в результате взрыва, и образуют гетерогенный плазменный поток, который соударяется с поверхностью подложки. При столкновении с подложкой этот поток распространяется во всех направлениях, охватывая плоскость подложки [16].

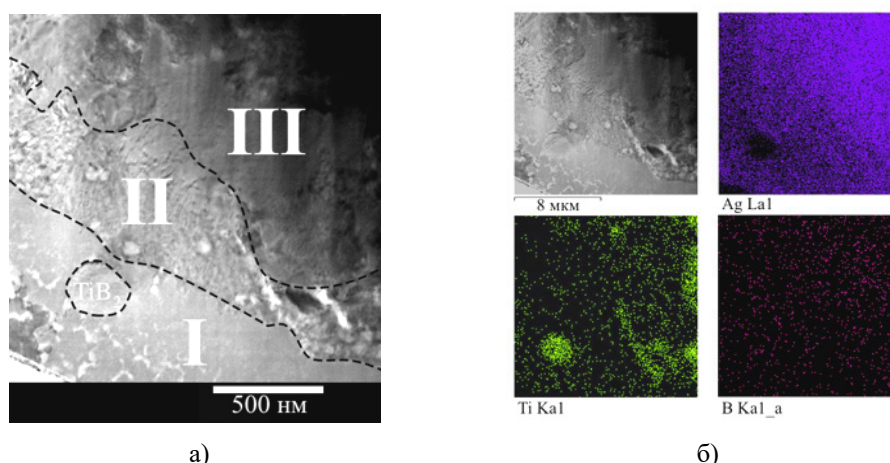


Рис.3. Светлопольное ПЭМ изображение полученного электровзрывным методом слоя покрытия системы TiB_2 -Ag, расположенного на расстоянии 200–1000 нм от поверхности (а). I, II и III – обозначение слоев. Карты распределения атомов Ag, Ti и B, полученные с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (б)

Fig.3. (a) TEM bright-field image of the TiB_2 -Ag coating layer located at a 200–1000 nm distance from the surface: I, II and III – layers indication. EDS element map images of Ag, Ti, and B (b)

На начальном этапе напыления поток гетерогенной плазмы состоит из двух зон: высокоскоростной струи с низкой плотностью и высокоплотного диска с низкой скоростью. В результате тепловое воздействие на поверхность имеет немонотонную зависимость во времени, то есть два максимума, обусловленные разнесенным во времени воздействием высокоскоростной плазменной струи и плазменного диска с низкой скоростью. Это обстоятельство способствует такому воздействию тепловых потоков на поверхность, когда плазма высокоскоростной струи плавит поверхность, а плазма с конденсированными частицами высокоплотного низкоскоростного диска насыщает расплавленный металл нижнего слоя, вызывая, таким образом, модификацию слоев и формирование уникальных градиентных структур [17]. При этом исходное расположение и форма порошковой составляющей на фольге влияют на формирование плазменного потока и фазовый состав получаемых покрытий.

Для определения изменений фазового состава после электронно-пучковой обработки использовался рентгенофазовый анализ. Методом рентгенофазового анализа в образцах выявлены фазы TiB_2 62, Ag 225, Cu 225, Cu_2O 166, Ti 164, B_2O_3 164, TiB_2 191, Cu_2Ti 63.

Продемонстрировано, что увеличение энергии и времени импульса электронного пучка приводило к уменьшению массовой доли фазы Ag 225 и увеличению содержания тугоплав-

ких фаз TiB_2 62, Ti 164, B_2O_3 164, TiB_2 191 (рис.4). В образцах № 3 и 4 присутствуют медьсодержащие фазы, что может свидетельствовать о чрезмерном испарении серебряной матрицы и плавления медной подложки под действием электронного пучка. Таким образом, можно сделать вывод, что режимы обработки №№ 3 и 4 приводят к деградации покрытия.

На рисунке 5 продемонстрирована структура поперечного сечения и соответствующие карты распределения элементов в покрытии системы TiB_2 -Ag после электронно-пучковой обработки. Толщина покрытия уменьшилась на 12-14 %. Структура покрытия аналогична образцам без обработки. Однако количество кластеров и крупных включений увеличилось. Крупные полости в покрытии значительно уменьшились в размерах. Диапазон размеров частиц TiB_2 снизился до 2,88-3,21 мкм.

На рисунке 5г показана микроструктура серебряной матрицы после электронно-пучковой обработки. Мелкие поры, образовавшиеся в результате электровзрывного напыления, были удалены и выглядели как ячеистые структуры. Ячеистая структура может формироваться на поверхности расплава за счет развивающейся капиллярной неустойчивости, возникающей вследствие термокапиллярных неустойчивостей [18]. Ранее подобные структуры были выявлены на поверхности и приповерхностном слое облученных алюминиевых сплавов [19].

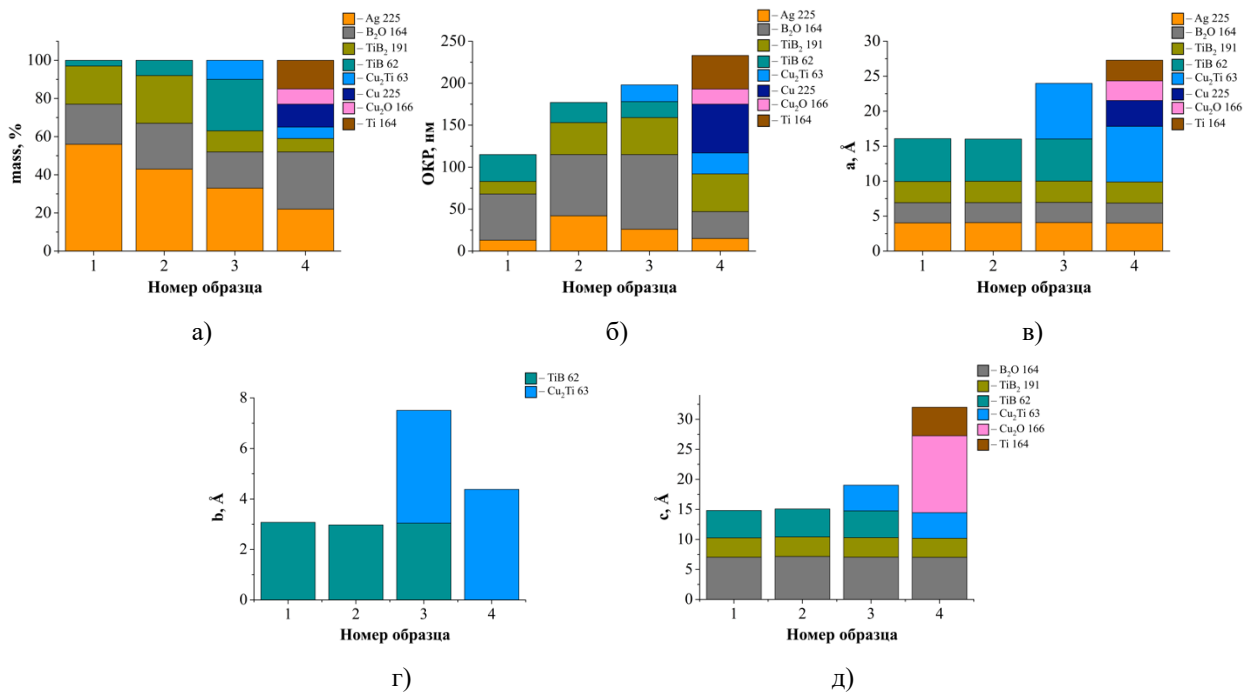


Рис.4. Параметры фаз, выявленных в покрытиях системы $\text{TiB}_2\text{-Ag}$, после электронно-пучковой обработки: (а) массовые доли; (б) ОКР; (в) параметр кристаллической решетки a ; (г) параметр кристаллической решетки b ; (д) параметр кристаллической решетки c

Fig.4. Parameters of the phases formed in the $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ coating after electron beam treatment: (a) mass fraction of phases; (b) CSR; (c) crystal lattice parameter a ; (d) crystal lattice parameter c

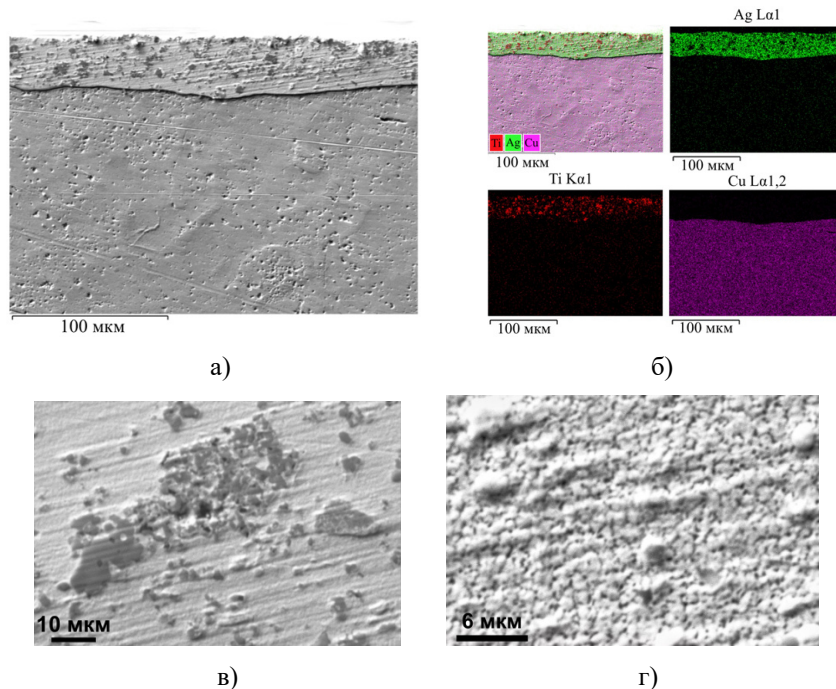


Рис.5. СЭМ изображения структуры покрытия системы $\text{TiB}_2\text{-Ag}$, модифицированного электронно-пучковой обработкой, и медной подложки (а); карты распределения атомов Ag, Ti и Cu, полученные с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (б); серебряная матрица с $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ кластером (в); микроструктуры серебряной матрицы после электронно-пучковой обработки (г)

Fig.5. SEM micrograph of the $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ coating treated by the electron beam in mode and copper substrate cross-section morphology (a); EDS element map images of Ag, Ti, and Cu (b); silver matrix with TiB_2 cluster (c); silver matrix microstructure after electron beam treatment (e)

На рисунке 6 показаны ПЭМ изображения и соответствующие карты распределения элементов слоя покрытия, расположенного на расстоянии 200 нм – 23,5 мкм от поверхности. Рассматриваемый слой состоит из наноразмерных зерен различной морфологии, их размер варьируется от десятков до сотен нанометров. Из-за быстрого охлаждения после электронно-

пучковой обработки у зерен остается мало времени для роста. Результаты ЭДС показывают, что зерна содержат атомы Ag, Ti и В. Вокруг этих зерен распределены дислокационные линии. Отмечена высокая плотность дислокаций. Помимо зерен были обнаружены оплавленные частицы TiB_2 со средним размером около 1,5 мкм.

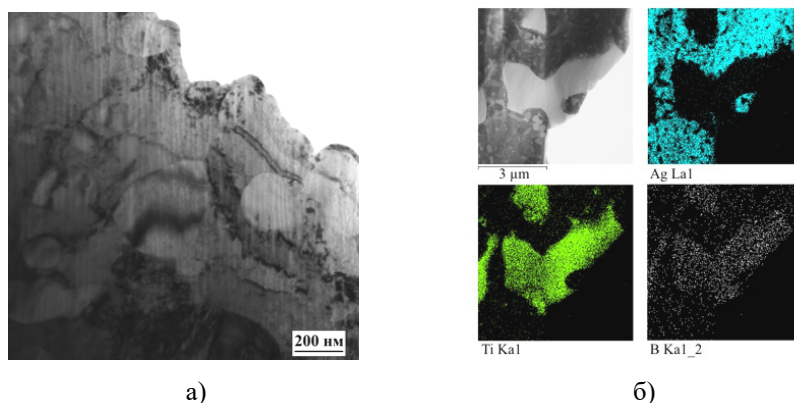


Рис.6. Светлопольное ПЭМ изображение модифицированного электронно-пучковой обработкой слоя покрытия системы TiB_2 -Ag, расположенного на расстоянии 200 нм – 23,5 мкм от поверхности (а). Карты распределения атомов Ag, Ti и В, полученные с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (б)

Fig.6. TEM bright-field image of the TiB_2 -Ag coating layer located at a distance of 200 nm–23.5 μ m from the surface after electron beam treatment and (b) EDS element map images of Ag, Ti, and B

Выводы

В настоящем исследовании покрытия системы TiB_2 -Ag, нанесенные электровзрывным методом на медную подложку, были подвергнуты электронно-пучковой обработке в четырех различных режимах. Воздействие электронного пучка на покрытие системы TiB_2 -Ag вызвало существенные изменения фазового состава. Так Ag, TiB_2 и B_2O стали основными фазами модифицированного покрытия. Содержание легкоплавкой фазы Ag снижается с увеличением плотности энергии и длительности электронного пучка. В тоже время возрастает присутствие тугоплавких фаз B_2O 164 и TiB_2 191. Также в режимах №№ 3 и 4 из-за нагрева и плавления медной подложки, вызванных избыточной энергией электронного пучка, образуются медьсодержащие фазы Cu 225, Cu_2O 166 и Cu_2Ti 63. Структура покрытий не претерпела существенных изменений в результате воздействия электронного пучка. Однако средний размер частиц TiB_2 уменьшился до значений 2,88 – 3,21 мкм. Под воздействием термокапиллярных неустойчивостей, вызванных электрон-

но-пучковой обработкой, микроструктура серебряной матрицы покрытия приобрела ячеистую структуру. Наноструктура модифицированных образцов представлена наноразмерными зернами различной морфологии и оплавленными частицами TiB_2 .

Список литературы

1. Grieseler R., Camargo M.K., Hopfeld M., Schmidt U., Bund A. et al. Copper-MAX-phase composite coatings obtained by electro-co-deposition: A promising material for electrical contacts // *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 321. P. 219–228.
2. Wu C., Zhao Q., Li N., Wang H., Yi D. et al. Influence of fabrication technology on arc erosion of Ag/10SnO₂ electrical contact materials // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. V. 766. P. 161–177.
3. Zhou Z., Zhao T., Feng Y., Zhao H., Qian G. Arc erosion characteristics evolution of Ag/Ti₃SiC₂ composites during repetitive arc breakdowns in SF₆ gaseous medium // *International*

- Journal of Applied Ceramic Technology. 2021. V. 18, N 5. P. 1716–1724.
4. Ray N., Kempf B., Mützel T., Froyen L., Vanmeensel K. et al. Effect of WC particle size and Ag volume fraction on electrical contact resistance and thermal conductivity of Ag–WC contact materials // *Materials & Design*. 2015. V. 85. P. 412–422.
 5. Kesim M.T., Yu H., Sun Y., Aindow M., Alpay S.P. Corrosion, oxidation, erosion and performance of Ag/W-based circuit breaker contacts: A review // *Corrosion Science*. 2018. V. 135. P. 12–34.
 6. Yangfang C., Xiaofang Y., Xiaoping B., Mingjiang Z., Jie L. et al. Research on the Influence of Different Oxide Particles on Properties of AgCdO Contact Material // *J. Phys.: Conf. Ser.* IOP Publishing, 2021. V. 1948, N 1. P. 012192.
 7. Wang X., Yang H., Chen M., Zou J., Liang S. Fabrication and arc erosion behaviors of AgTiB₂ contact materials // *Powder Technology*. 2014. V. 256. P. 20–24.
 8. Nilsson O., Hauner F., Jeannot D. Replacement of AgCdO by AgSnO/sub 2/ in DC contactors // *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts, 2004*. 2004. P. 70–74.
 9. Wang X., Li G., Zou J., Liang S., Fan Z. Investigation on preparation, microstructure, and properties of AgTiB₂ composite // *Journal of Composite Materials*. SAGE Publications Ltd STM, 2011. V. 45, N 12. P. 1285–1293.
 10. Tamura H., Konoue M., Sawaoka A.B. Zirconium boride and tantalum carbide coatings sprayed by electrothermal explosion of powders // *J Therm Spray Tech*. 1997. V. 6, N 4. P. 463–468.
 11. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams // *Russ Phys J*. 2008. V. 51, N 5. P. 505–516.
 12. Li C., Feng J., Yuan W., Cao Y., Han R. Discharge Characteristics and Dynamic Process of Directional Spraying Binary and Ternary Alloy Coating via Electrical Explosion Method // *Proceedings of the 4th International Symposium on Plasma and Energy Conversion* / ed. Dai D. et al. Singapore: Springer Nature, 2023. P. 302–311.
 13. Romanov D.A. Improving die tooling properties by spraying TiC–Ti–Al and TiB₂–Ti–Al electro-explosive coatings // *Mater. Res. Express*. 2020. V. 7, N 4. P. 045010.
 14. Romanov D., Moskovskii S., Konovalov S., Sosnin K., Gromov V. et al. Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. V. 8, N 6. P. 5515–5523.
 15. Vlasova M., Kakazey M., Aguilar P.A. M., Tapia R.G., Reséndiz-González M.C. et al. TiN–TiB₂ ceramics degradation in the region of a steady-state laser heating // *Surface and Coatings Technology*. 2019. V. 378. P. 124738.
 16. Liu Q., Wang Y., Bai Y., Li Z.D., Tan G.L. et al. Formation mechanism of gas phase in supersonic atmospheric plasma sprayed NiCr–Cr₃C₂ cermet coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2020. V. 397. P. 126052.
 17. Romanov D.A., Moskovskii S.V., Glezer A.M., Gromov V.E., Sosnin K.V. Phase Composition, Structure, and Wear Resistance of Electric-Explosive CuO–Ag System Coatings after Electron Beam Processing // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83, N 10. P. 1270–1274.
 18. Sarychev V., Nevskii S., Konovalov S., Granovskii A. Modeling of the initial stages of the formation of heterogeneous plasma flows in the electric explosion of conductors // *Current Applied Physics*. 2018. V. 18, N 10. P. 1101–1107.
 19. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Yu.D., Gromov V.E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system // *Steel Transl*. 2011. V. 41, N 6. P. 464–468.

Информация об авторах

В. В. Почетуха – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

А. Д. Филяков – аспирант Сибирского государственного индустриального университета, младший научный сотрудник лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий Сибирского государственного индустриального университета.

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

Е. С. Вацук – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных и экономических дисциплин Филиала Кузбасского го-

сударственного университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевск.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Grieseler, R., Camargo, M. K., Hopfeld, M., Schmidt, U., Bund, A. & Schaaf, P. (2017). Copper-MAX-phase composite coatings obtained by electro-co-deposition: A promising material for electrical contacts. *Surface and Coatings Technology*, 321, 219–228.
2. Wu, C., Zhao, Q., Li, N., Wang, H., Yi, D. & Weng, W. (2018). Influence of fabrication technology on arc erosion of Ag/10SnO₂ electrical contact materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 766, 161–177.
3. Zhou, Z., Zhao, T., Feng, Y., Zhao, H. & Qian, G. (2021). Arc erosion characteristics evolution of Ag/Ti₃SiC₂ composites during repetitive arc breakdowns in SF₆ gaseous medium. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 18(5), 1716–1724.
4. Ray, N., Kempf, B., Mützel, T., Froyen, L., Vanmeensel, K. & Vleugels, J. (2015). Effect of WC particle size and Ag volume fraction on electrical contact resistance and thermal conductivity of Ag–WC contact materials. *Materials & Design*, 85, 412–422.
5. Kesim, M. T., Yu, H., Sun, Y., Aindow, M. & Alpay, S. P. (2018). Corrosion, oxidation, erosion and performance of Ag/W-based circuit breaker contacts: A review. *Corrosion Science*, 135, 12–34.
6. Yangfang, C., Xiaofang, Y., Xiaoping, B., Mingjiang, Z., Jie, L., Changlin, Y. & Xiufang, Z. (2021). Research on the Influence of Different Oxide Particles on Properties of AgCdO Contact Material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1948(1), 012192.
7. Wang, X., Yang, H., Chen, M., Zou, J. & Liang, S. (2014). Fabrication and arc erosion behaviors of AgTiB₂ contact materials. *Powder Technology*, 256, 20–24.
8. Nilsson, O., Hauner, F. & Jeannot, D. (2004). Replacement of AgCdO by AgSnO/sub 2/ in DC contactors. *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts, 2004.*, 70–74.
9. Wang, X., Li, G., Zou, J., Liang, S. & Fan, Z. (2011). Investigation on preparation, microstructure, and properties of AgTiB₂ composite. *Journal of Composite Materials*, 45(12), 1285–1293.
10. Tamura, H., Konoue, M. & Sawaoka, A. B. (1997). Zirconium boride and tantalum carbide coatings sprayed by electrothermal explosion of powders. *Journal of Thermal Spray Technology*, 6(4), 463–468.
11. Koval', N. N. & Ivanov, Yu. F. (2008). Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams. *Russian Physics Journal*, 51(5), 505–516.
12. Li, C., Feng, J., Yuan, W., Cao, Y. & Han, R. (2023). Discharge Characteristics and Dynamic Process of Directional Spraying Binary and Ternary Alloy Coating via Electrical Explosion Method. In D. Dai, C. Zhang, Z. Fang & X. Lu (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Plasma and Energy Conversion* (pp. 302–311). Singapore: Springer Nature.
13. Romanov, D. A. (2020). Improving die tooling properties by spraying TiC–Ti–Al and TiB₂–Ti–Al electro-explosive coatings. *Materials Research Express*, 7(4), 045010.
14. Romanov, D., Moskovskii, S., Kononov, S., Sosnin, K., Gromov, V. & Ivanov, Y. (2019). Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5515–5523.
15. Vlasova, M., Kakazey, M., Aguilar, P. A. M., Tapia, R. G. & Reséndiz-González, M. C. et al. (2019). TiN–TiB₂ ceramics degradation in the region of a steady-state laser heating. *Surface and Coatings Technology*, 378, 124738.
16. Liu, Q., Wang, Y., Bai, Y., Li, Z. D. & Tan, G. L. et al. (2020). Formation mechanism of gas phase in supersonic atmospheric plasma sprayed NiCr–Cr₃C₂ cermet coatings. *Surface and Coatings Technology*, 397, 126052.
17. Romanov, D. A., Moskovskii, S. V., Glezer, A. M., Gromov, V. E. & Sosnin, K. V. (2019). Phase Composition, Structure, and Wear Resistance of Electric-Explosive CuO–Ag System Coatings after Electron Beam Processing. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 83(10), 1270–1274.
18. Sarychev, V., Nevskii, S., Kononov, S. & Granovskii, A. (2018). Modeling of the initial

stages of the formation of heterogeneous plasma flows in the electric explosion of conductors. *Current Applied Physics*, 18(10), 1101–1107.

19. Romanov, D. A., Budovskikh, E. A., Zhmakin, Yu. D. & Gromov, V. E. (2011). Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system. *Steel in Translation*, 41(6), 464–468.

Information about the authors

V. V. Pochetukha – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Directorate of Scientific Research of the Siberian State Industrial University.

A. D. Filyakov – Postgraduate Student of the Siberian State Industrial University, junior researcher of the Laboratory of Electroexplosive

Spraying of High-Reliability Coatings of the Siberian State Industrial University.

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

E. S. Vashchuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences and Economic Disciplines, Branch of Kuzbass State University named after T.F. Gorbachev in Prokopyevsk.

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department of the Department of Natural Sciences named after Professor V. M. Finkel, Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 09.09.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 02.12.2024.

The article was received by the editorial board on 09 Sept. 2024; approved after reviewing 17 Oct. 2024; accepted for publication 02 Dec. 2024.