

Научная статья

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

УДК 621.762; 537.523.4

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.010

ОСАЖДЕНИЕ ПОРОШКА ДИСИЛИЦИДА ВОЛЬФРАМА НА ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ Ti6Al4V МЕТОДОМ ЭИЛ

Александр Анатольевич Бурков¹, Мария Андреевна Кулик^{2†}, Александра Юрьевна Быцуро³

^{1, 2, 3} Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН, ул. Тихоокеанская, 153, 680042, Хабаровск, Россия

¹ burkovalex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

² marijka80@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-4857-1887>

³ alex_btsr@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4750-7970>

Аннотация. Покрyтия на основе Ti–WSi способны обеспечить жаростойкость конструкционных материалов, а также устойчивость к коррозии и изнашиванию. Методом электроискрового легирования титанового сплава Ti6Al4V в анодной смеси из титановых гранул с добавлением 2, 6 и 10 об. % порошка дисилицида вольфрама получены металлокерамические Ti–WSi покрытия. Структуру покрытий изучали методами рентгенофазового анализа, растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. Испытания на жаростойкость проводились при температуре 900 °С в течении 100 часов. Износостойкость покрытий исследовались в условиях сухого трения при нагрузке 25 Н. По данным рентгенофазового анализа в составе покрытий присутствуют низкотемпературный WSi₂, αTi, Ti₅Si₃ и высокотемпературный WSi₂. С ростом содержания WSi₂ в анодной смеси микротвердость покрытий монотонно возрастала с 11,93 до 13,24 ГПа. Средние значения коэффициента трения покрытий находились в диапазоне от 0,75 до 0,86. По результатам испытаний, износостойкость покрытий была от 3 до 7 раз выше, чем у сплава Ti6Al4V. Применение электроискровых Ti–WSi покрытий позволяет повысить жаростойкость титанового сплава Ti6Al4V от 7 до 14 раз.

Ключевые слова: дисилицид вольфрама, Ti–WSi покрытие, сплав Ti6Al4V, электроискровое легирование, жаростойкость, твердость, коррозия, коэффициент трения, износ.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01108-23-02.

Для цитирования: Бурков А.А., Кулик М.А., Быцуро А.Ю. Осаждение порошка дисилицида вольфрама на титановый сплав Ti6Al4V методом ЭИЛ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 2. С. 220–229. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.010.

Original article

DEPOSITION OF TUNGSTEN DISILICIDE POWDER ON TITANIUM ALLOY Ti6Al4V BY ESD TECHNIQUE

Alexander A. Burkov¹, Marija A. Kulik^{2†}, Alexandra Yu. Bytsura³

^{1, 2, 3} Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS, Tikhookeanskaya Str., 153 Khabarovsk, 680042, Russia

¹ burkovalex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

² marijka80@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-4857-1887>

³ alex_btsr@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4750-7970>

Abstract. Ti–WSi-based coatings can provide thermal stability of structural materials, their resistance to oxidation and corrosion, as well as resistance to abrasive wear. Ti–WSi₂ coatings were obtained using the electrospark deposition method on titanium alloy Ti6Al4V in an anode mixture of titanium granules with the addition of 2, 6, 10 vol. % tungsten disilicide powder. The structure of the coatings was studied by X-ray phase analysis, scanning electron microscopy and micro-X-ray spectral analysis. Oxidation resistance tests were carried out at a temperature of 900 °C for 100 hours. The wear resistance of the coatings was studied under dry friction conditions at a load of 25 N. According to X-ray phase analysis, the composition of the coatings contains low-temperature WSi₂, αTi,

Ti₅Si₃, and high-temperature WSi₂. With increasing WSi₂ content in the anode mixture, the microhardness of the coatings increased from 11.93 to 13.24 GPa. The average values of the coefficient of friction of the coatings ranged from 0.75 to 0.86. According to test results, the wear resistance of the coatings was from 3 to 7 times higher than that of the Ti6Al4V alloy. The use of electrospark deposition Ti–WSi coatings makes it possible to increase the oxidation resistance of titanium alloy Ti6Al4V from 7 to 14 times.

Keywords: tungsten disilicide, Ti–WSi coating, Ti6Al4V alloy, electrospark deposition, oxidation resistance, hardness, corrosion, coefficient of friction, wear.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of state assignment No. 075-01108-23-02.

For citation: Burkov, A. A., Kulik, M. A. & Bytsura, A. Yu. (2024). Deposition of tungsten disilicide powder on titanium alloy Ti6Al4V by ESD technique. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(2), 220–229. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.010.

Введение

Дисилицид вольфрама (WSi₂) является электропроводной керамикой, обладающей высокой твердостью (13 ГПа) [1], высокой температурой плавления (2160°C), коррозионной устойчивостью и высокой жаропрочностью [2]. Высокая жаростойкость WSi₂ обусловлена, образующейся на его поверхности самовосстанавливающейся защитной пленкой SiO₂ [3]. Кроме того, WSi₂ обладает ценными термоэлектрическими свойствами [4]. В настоящее время силициды вольфрама вызывают большой интерес благодаря широкому спектру высокотемпературных применений: нагревательные элементы и газовые горелки [5], компоненты горячей секции турбинных авиационных двигателей и автомобилестроение [6, 7]. Благодаря высокой твердости и жаростойкости, перспективно наносить защитные металлокерамические (МК) покрытия из WSi₂, способные обеспечить стойкость к высокотемпературному окислению и коррозии, а также сопротивляемость к изнашиванию. Покрытия из WSi₂ наносят на металлические подложки различными технологиями: методом горячего погружения [8]; вакуумного [9-10] и атмосферного газопламенного напыления [11], а также электроискрового легирования (ЭИЛ), используя электроды Fe-Cr-WSi₂ [12].

Метод ЭИЛ основан на явлении электрической эрозии и полярного переноса материала анода на катод при протекании микросекундных разрядов в газовой среде [13]. При сближении анода и катода происходит кратковременный электрический разряд, который расплавляет материал электрода и переносит его в микрованну расплава на поверхности обрабатываемой детали. На поверхности катода образуется покрытие модифицированной структуры и состава, что обусловлено конвективным пе-

ремешиванием металлов в микрованне расплава и высокими скоростями охлаждения материала после окончания разряда [14]. Преимуществом данного метода является, высокая адгезия формируемых покрытий без заметного термического воздействия на обрабатываемую деталь [13, 15]. Видоизмененный метод электроискрового легирования нелокализованным электродом (ЭИЛНЭ) позволяет обрабатывать криволинейные поверхности деталей в автоматическом режиме [16]. Такой способ ЭИЛ имеет ряд преимуществ, поскольку позволяет использовать порошки в качестве основного компонента покрытий [17]. Технология ЭИЛНЭ позволяет наносить металлокерамические покрытия на титановый сплав Ti6Al4V [18]. Перспективно наносить WSi₂ покрытия на титановый сплав, поскольку его основными недостатками являются низкая твердость и жаростойкость [18, 19]. Кроме того, в процессе ЭИЛНЭ титанового сплава с использованием порошка WSi₂ будет происходить его частичное взаимодействие с титаном с формированием силицидов титана, также обладающих ценными свойствами. Цель работы – исследовать возможность нанесения порошка дисилицида вольфрама (WSi₂) на титановый сплав (Ti6Al4V) методом ЭИЛНЭ и изучить структуру, жаростойкость и триботехнические свойства покрытий в зависимости от концентрации WSi₂ в анодной смеси (АС).

Методика и материалы

Были приготовлены три анодные смеси, состоящие из разного количества порошка дисилицида вольфрама и гранул титанового сплава BT1-00 (табл.1). Порошок имел средний диаметр частиц 9,61±5,13 мкм. Фазовый анализ порошка показал, что он состоит из низкотемпературной фазы WSi₂ с небольшими примесями вольфрама, кремния и W₅Si₃ (рис.1). Грану-

лы изготавливались путем нарезания прутков сплава ВТ1-00 диаметром $4 \pm 0,5$ мм на отрезки длиной 4 ± 1 мм. Покрытие наносилось на подложку из сплава Ti6Al4V в форме цилиндра высотой 10 ± 1 мм и диаметром $12 \pm 0,1$ мм. Схема установки для ЭИЛНЭ подробно описана в работе [18]. Прямоугольные импульсы разрядного тока имели среднюю амплитуду 110 А при напряжении 30 В. Длительность импульсов составляла 100 мкс, частота повторения – 1 кГц. Общая продолжительность ЭИЛНЭ составляла 10 минут. В рабочий объем контейнера вводился защитный газ (аргон) с рас-

ходом $5 \text{ л}\cdot\text{мин}^{-1}$. Фазовый состав и структуру покрытий исследовали с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в Cu-K α -излучении. Микроструктура покрытий исследовалась с применением растрового электронного микроскопа Vega 3 LMH (Tescan, Чехия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) X-max 80 (Oxford Instruments, Великобритания). Шероховатость покрытий была измерена на профилометре TR 200 (TIME GROUP Inc., Китай). Краевой угол смачивания определяли методом “сидячей капли” при комнатной температуре [20].

Таблица 1. Состав анодных смесей, обозначение покрытий и их характеристики

Table 1. Composition of anode mixtures, designation of coatings and their characteristics

Обозначение образцов	WSi2	WSi6	WSi10
Гранулы ВТ1-00, об. %	98	94	90
Порошок WSi ₂ , об. %	2	6	10
Толщина, мкм	$18,7 \pm 2,9$	$20,2 \pm 3,3$	$23,58 \pm 9,46$
Шероховатость (Ra), мкм	$4,22 \pm 0,68$	$4,30 \pm 0,90$	$5,17 \pm 0,62$
УСВ, °	$76,83 \pm 1,2$	$76,18 \pm 0,75$	$75,59 \pm 0,90$

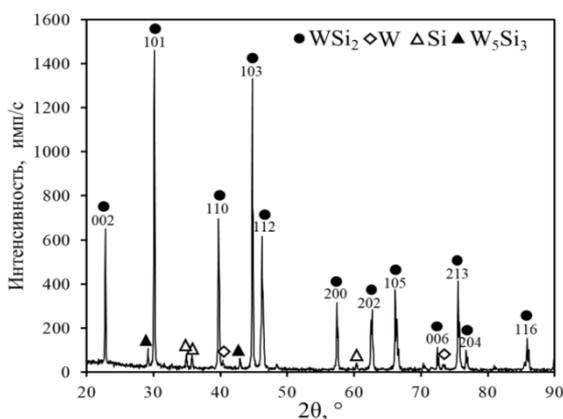


Рис.1. Рентгеновская дифрактограмма порошка дисилицида вольфрама

Fig.1. X-ray diffraction pattern of tungsten disilicide powder

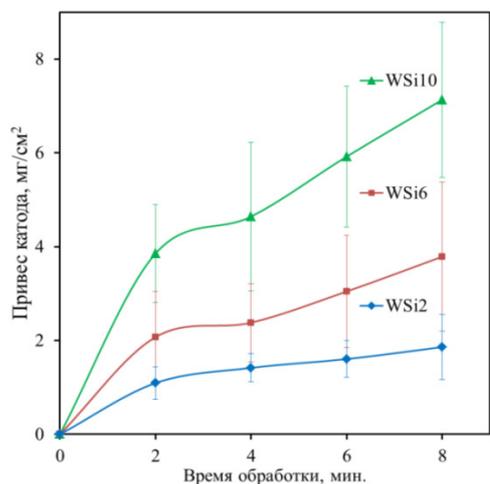
Кинетику массопереноса изучали путем взвешивания образцов, через каждые 2 минуты нанесения покрытия на аналитических весах «Vibra НТ120» с точностью до 0,1 мг. Поляризационные испытания проводились в трехэлектродной ячейке с 3,5 %-ным раствором NaCl с использованием потенциостата Р-2Х (Electro Chemical Instruments, г. Черногловка) со скоростью сканирования 4 мВ/с. Стандартный хлорсеребряный электрод выступал электродом сравнения, а в качестве контрэлектрода применялся спаренный платиновый электрод ЭТП-02.

Перед съемкой образцы выдерживались 2 часа для стабилизации тока разомкнутой цепи. Твердость покрытий измеряли на микротвердометре ПМТ-3М (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) при нагрузке 0,5 Н по методу Виккерса. Износостойкость образцов исследовалась на лабораторной установке по схеме «штифт на диске», следуя процедуре ASTM G99-17, при сухом трении скольжения на скорости $0,47 \text{ мс}^{-1}$ при нагрузке 25 Н. Для записи коэффициента трения использовался бесконтактный датчик крутящего момента вращения М40-50. Время тестирования составляло 10 мин. В качестве контртела использовались диски из быстрорежущей стали Р6М5 с твердостью 60 HRC. Износ оценивали гравиметрическим способом. Образец каждого типа испытывался, по меньшей мере, трехкратно.

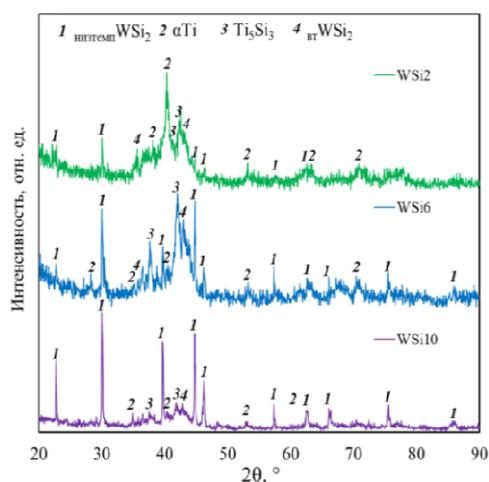
Результаты и их обсуждение

На рис.2а показаны зависимости привеса катода от времени ЭИЛ. В ходе ЭИЛНЭ возникали электрические разряды между титановыми гранулами и подложкой, в результате которых происходил жидкофазный перенос металла с поверхности гранул на поверхность подложки. Частицы порошка WSi₂, оказавшиеся на поверхности электродов в момент развития разрядного канала, сплавлялись с металлом. Для всех образцов после 2 минут обработки наблю-

далось замедление привеса катода, что также характерно для традиционного ЭИЛ [21]. Средняя скорость привеса катода повышалась с ростом концентрации порошка WSi_2 в АС. Это объясняется улучшением условий возникновения разрядов при наличии частиц порошка в межэлектродном промежутке [22].



а)



б)

Рис.2. Прирост массы подложки как функция от времени осаждения (а) и рентгенограммы полученных покрытий (б)

Fig.2. Mass gain of the substrate as a function of deposition time (a) and XRD patterns of resulted coatings (b)

На рис.2б показаны результаты рентгенофазового анализа, которые указывают на металлокерамическую структуру приготовленных покрытий. Так в составе покрытий присутствуют фазы низкотемпературного и высокотемпературного дисилицида вольфрама, αTi и силицид титана Ti_5Si_3 . Поскольку исходный порошок WSi_2 состоял из низкотемпературной фа-

зы (рис.1), то можно сделать вывод, что высокотемпературная фаза образовалась в результате перекристаллизации WSi_2 в условиях разряда. Кроме того часть частиц WSi_2 взаимодействовала с расплавом титана, что привело к образованию ценной фазы силицида титана Ti_5Si_3 [23, 24]. С ростом концентрации порошка WSi_2 в АС концентрация низкотемпературной фазы дисилицида вольфрама в покрытиях увеличивалась. Это приводит к выводу, что в основном реализуется механизм формирования металлокерамики путем внедрения частиц керамики в металлическую матрицу. Это выгодно отличает метод ЭИЛНЭ с использованием порошка, по сравнению с традиционным ЭИЛ, для осаждения МК покрытий [13].

На рис.3а,б изображены поперечные сечения покрытий WSi_2 и WSi_{10} . Все покрытия состоят из светло-серой матрицы с белыми включениями, предположительно являющимися WSi_2 . С ростом добавки порошка в ЭИЛНЭ концентрация включений увеличивается. Толщина покрытий монотонно повышалась от 18,7 мкм до 23,58 мкм с ростом концентрации порошка в АС (табл.1), что хорошо согласуется с данными по массопереносу (рис.2а). Распределение элементов по глубине покрытий, согласно ЭДС анализу, показано на рис.3в,г. При переходе от поверхности покрытия к подложке концентрация титана постепенно возрастала, а содержание вольфрама и кремния снижалось. В покрытии WSi_2 концентрации вольфрама и кремния были ниже, чем в WSi_{10} , что согласуется с результатами рентгенофазового анализа (рис.2б). Высокие концентрации титана в покрытии обусловлены перемешиванием перенесенного материала с титаном подложки, поскольку ранее замечено, что перенос металла с гранул в покрытие составляет менее 10 % [25]. В структуре покрытия WSi_{10} наблюдаются поперечные трещины, что может быть вызвано охрупчиванием из-за увеличенного содержания кремния. Подобное ранее наблюдалось для Ti-Si сплавов [26]. Шероховатость покрытий, по критерию R_a , находилась в диапазоне от 4,22 до 5,17 мкм (табл.1), что не выше чем у покрытий, полученных традиционным ЭИЛ. Смачиваемость поверхности покрытий дистиллированной водой, выражаемая в терминах контактного угла, находилась в диапазоне от 75,59 до 76,83° (табл.1), что выше в сравнении со сплавом Ti6Al4V (57,9°). Это говорит о том, что нанесение Ti-WSi покрытий снижает активность поверхности титанового сплава к загрязнению и коррозии [27].

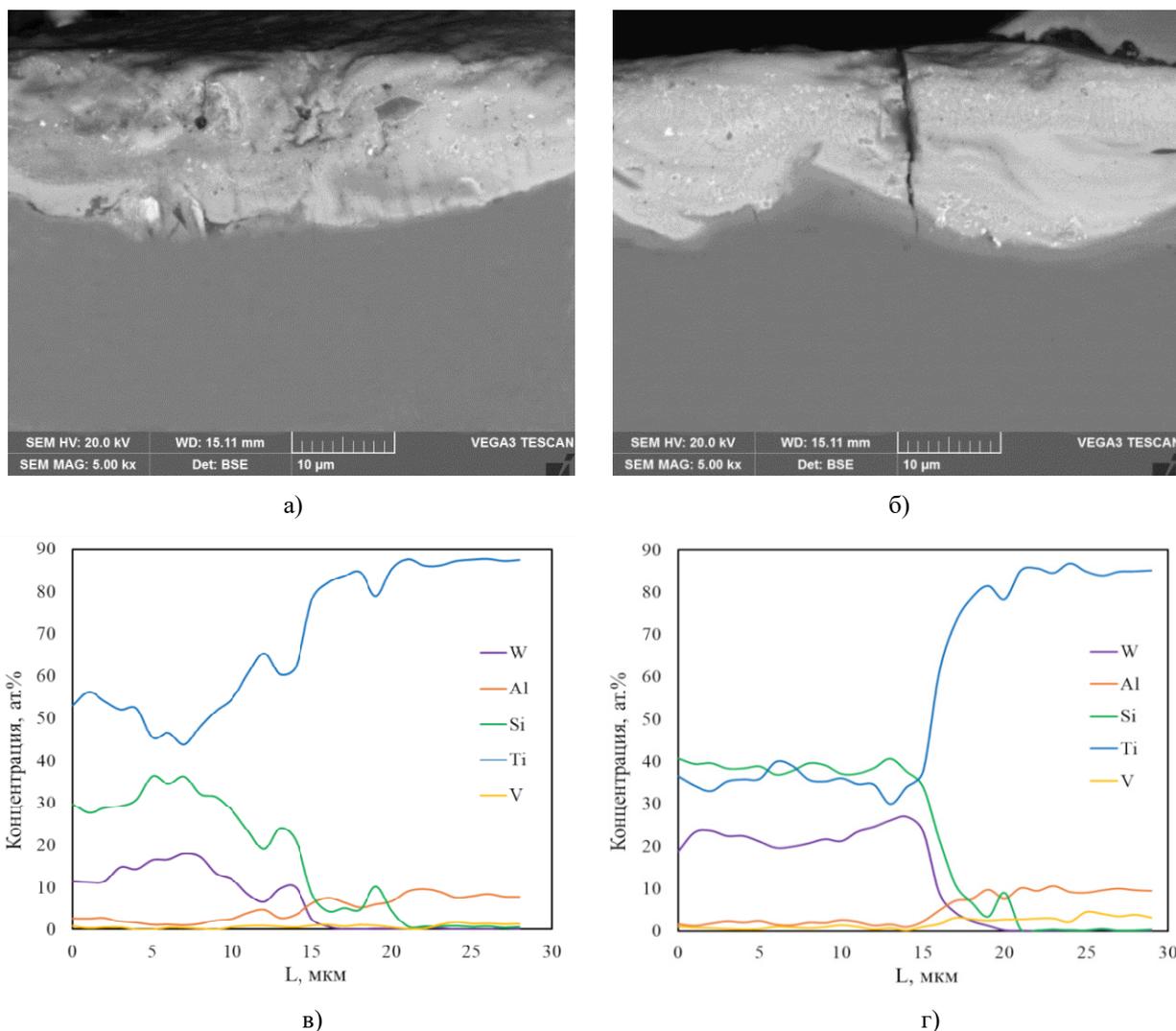


Рис.3. Электронные изображения поперечного сечения покрытий: WSi_2 (а), WSi_{10} (б) и распределение элементов в сечении соответствующих покрытий согласно ЭДС анализу (в, г)

Fig.3. Electron images of the cross section of coatings: WSi_2 (a), WSi_{10} (b) and distribution of elements in the cross section of the corresponding coatings according to EDS analysis (c, d)

На рис.4 показаны средние значения микротвердости $Ti-WSi$ покрытий по сравнению с титановым сплавом $Ti6Al4V$. С ростом содержания WSi_2 в АС микротвердость покрытий монотонно возрастала с 11,93 до 13,24 ГПа. Микротвердость покрытий соответствует твердости дисилицида вольфрама – 13 ГПа [1]. Таким образом, нанесение $Ti-WSi$ покрытий позволяет повысить твердость поверхности титанового сплава $Ti6Al4V$ от 3,98 до 4,41 раз.

Были проведены трибологические испытания приготовленных $Ti-WSi$ покрытий в режиме сухого скольжения. Среднее значения коэффициента трения ($K_{тр}$) покрытий монотонно повышались от 0,75 до 0,86 с ростом содержания WSi_2 в АС (рис.5а). Величина $K_{тр}$ для покрытий

была выше, чем у титанового сплава $Ti6Al4V$. Возрастание $K_{тр}$ с ростом концентрации твердых фаз в покрытиях позволяет предположить, что их более высокий $K_{тр}$, чем у сплава, вызван тем, что твердые фазы покрытия царапают контртело, и чем их больше, тем выше сила трения. Поэтому несмотря на более высокий $K_{тр}$ износостойкость покрытий была от 3 до 7 раз выше, чем у сплава $Ti6Al4V$ (рис.5б). Так приведенный износ покрытий находился в диапазоне от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $3,5 \cdot 10^{-5}$ mm^3/Nm , причем он монотонно снижался с ростом концентрации WSi_2 в АС. Это согласуется с данными по микротвердости покрытий (рис.4) и объясняется повышением концентрации армирующих фаз в покрытиях.

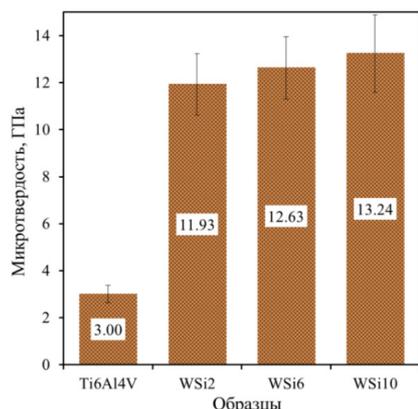
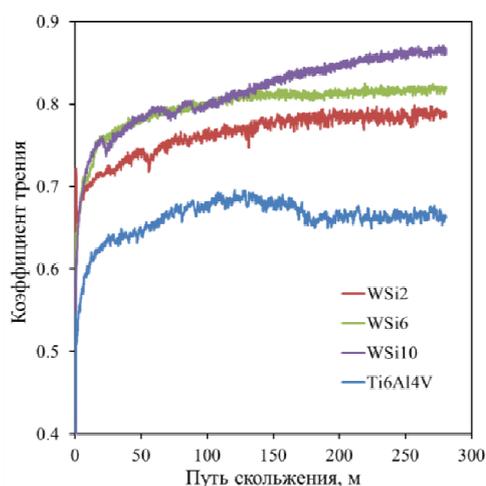
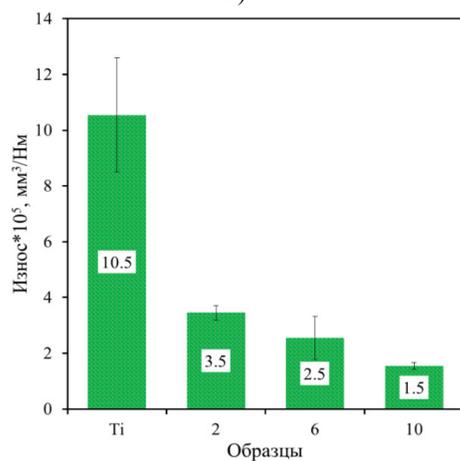


Рис.4. Микротвердость поверхности покрытий по сравнению с титановым сплавом Ti6Al4V

Fig.4. Microhardness of the coating surface compared to titanium alloy Ti6Al4V



а)



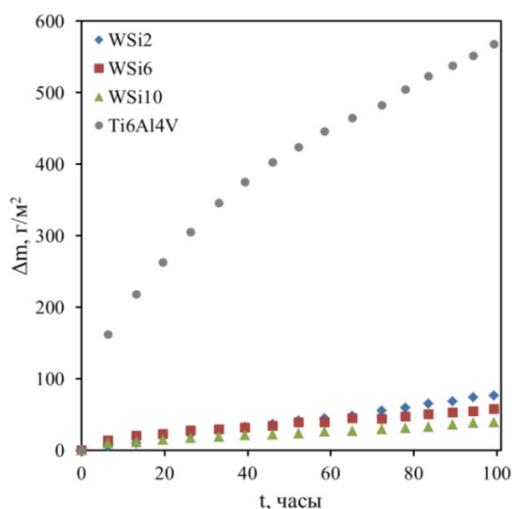
б)

Рис.5. Коэффициент трения (а) и износ (б) покрытий по сравнению с титановым сплавом Ti6Al4V при нагрузке 25 Н

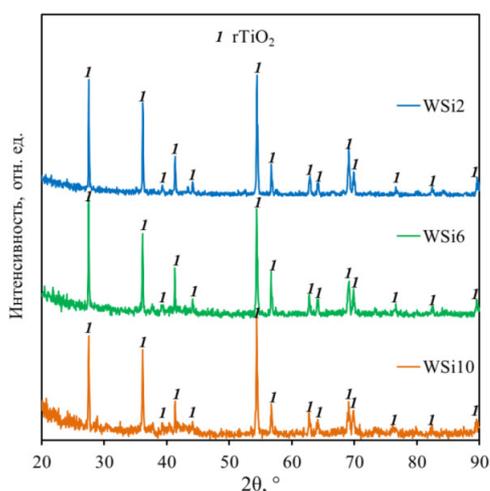
Fig.5. The coefficient of friction (а) and wear (б) of coatings in comparison with titanium alloy Ti6Al4V at a load of 25 N

На рис.6а показаны результаты циклических испытаний образцов из титанового сплава Ti6Al4V с Ti–WSi покрытиями на жаростойкость при температуре 900 °С. По результатам 100 часов испытаний, привес образцов с покрытиями составил от 39,4 до 76,4 г/м², причем он монотонно снижался с ростом добавки WSi₂ в АС. Таким образом, жаростойкость покрытий повышалась с ростом концентрации кремния в покрытиях. На рентгеновских дифрактограммах поверхности всех образцов после испытания на жаростойкость наблюдаются рефлексы рутила rTiO₂. Таким образом, привес образцов, в процессе высокотемпературного окисления, обусловлен фиксацией кислорода с образованием фазы рутила. Высокую жаростойкость Ti–Si материалов к окислению принято объяснять образованием плотной пленки SiO₂ [28], однако на рентгеновской дифрактограмме она не зафиксирована по причине низкой толщины. Сравнение итогового привеса образцов приводит к выводу, что применение электроискровых Ti–WSi покрытий позволяет повысить жаростойкость титанового сплава Ti6Al4V от 7 до 14 раз. Стоит отметить, что наиболее распространенная керамика на основе вольфрама (WC) характеризуется низкой жаростойкостью и тем самым ухудшает жаростойкость МК композиций [18]. Поэтому, силицид вольфрама можно рассматривать в качестве жаростойкой альтернативы WC для МК композиций.

На рис.7 показаны результаты поляризационных испытаний Ti–WSi образцов в 3,5 % р-ре NaCl. Из него следует, что потенциал коррозии (E_{corr}) покрытий монотонно возрастал в диапазоне от -0,55 до -0,43 В с увеличением концентрации кремния в покрытии. Потенциодинамическая кривая покрытия WSi₁₀ демонстрирует меньший E_{corr} , по сравнению с титановым сплавом Ti6Al4V, что указывает на более высокую стойкость к самопроизвольной коррозии. Для исследуемых образцов была рассчитана плотность тока коррозии (I_{corr}) (табл.2), которая пропорциональна скорости коррозии. Плотность тока коррозии у исследуемых образцов монотонно снижалась от $7,10 \cdot 10^{-6}$ до $1,32 \cdot 10^{-6}$ А/см² с увеличением концентрации WSi₂ в АС. Образцы WSi₂ и WSi₆ продемонстрировали более высокую I_{corr} по сравнению с титановым сплавом Ti6Al4V, тогда как у образца WSi₁₀ I_{corr} была ниже – $1,32 \cdot 10^{-6}$ А/см².



а)



б)

Рис.6. Жаростойкость Ti–WSi покрытий и сплава Ti6Al4V при температуре 900 °C (а) и рентгеновские дифрактограммы покрытий после испытания на жаростойкость (б)

Fig.6. Oxidation resistance of Ti–WSi coatings and Ti6Al4V alloy at a temperature of 900 °C (a) and X-ray diffraction patterns of coatings after oxidation resistance testing (б)

Таблица 2. Потенциал (E_{corr}) и ток (I_{corr}) коррозии покрытий, извлеченные из поляризационных кривых

Table 2. Potential (E_{corr}) and current (I_{corr}) of coating corrosion extracted from polarization curves

Параметры	E_{corr} , В	I_{corr} , мкА
Ti6Al4V	-0,5146	2,47
WSi ₂	-0,5465	7,10
WSi ₆	-0,514	2,53
WSi ₁₀	-0,4342	1,32

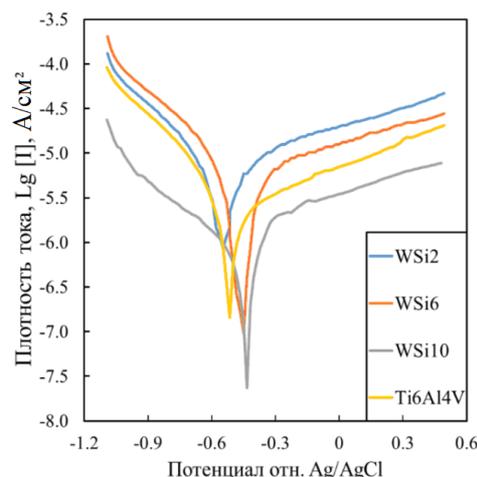


Рис.7. Потенциодинамические поляризационные кривые WSi покрытий и титанового сплава Ti6Al4V

Fig.7. Potentiodynamic polarization curves for WSi coatings and titanium alloy Ti6Al4V

Выводы

Методом ЭИЛ впервые получено Ti–WSi покрытие на Ti6Al4V сплаве в смеси гранул из титанового сплава BT1-00 и порошка WSi₂. Для всех образцов наблюдался монотонный привес катода с ростом времени обработки. Толщина осажденного Ti–WSi покрытия составила от 18,7 до 23,58 мкм. В составе покрытий присутствуют фазы низкотемпературного и высокотемпературного дисилицида вольфрама, αTi и силицида титана Ti₅Si₃. Показано, что изменение добавки порошка WSi₂ в АС позволяет регулировать концентрацию армирующих фаз в покрытии. Угол контакта с водой для Ti–WSi покрытия равен 76,83–75,59°. С ростом содержания WSi₂ в анодной смеси микротвердость покрытий возрастала с 11,93 до 13,24 ГПа. Средние значения коэффициента трения покрытий находились в диапазоне от 0,75 до 0,86. По результатам испытаний износостойкость покрытий была от 3 до 7 раз выше, чем у сплава Ti6Al4V. Применение электроискровых Ti–WSi покрытий позволяет повысить жаростойкость титанового сплава Ti6Al4V от 7 до 14 раз. Поскольку образец WSi₁₀ показал лучшие коррозионные и трибологические свойства, то можно сделать вывод, что оптимальная концентрация порошка WSi₂ в смеси с титановыми гранулами находится около 10 об. %.

Список литературы

1. Murthy T.C., Sonber J.K., Subramanian C., Hubli R.C., Suri A.K. Densification, characterization and oxidation studies of TiB₂–WSi₂ composite

- // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2012. V. 33. P. 10–21.
2. Wang S., Pan Y., Lin Y. First-principles study of the effect of Cr and Al on the oxidation resistance of WSi_2 // Chemical Physics Letters. 2018. V. 698. P. 211–217.
3. Kim H.-S., Yoon J.-K., Kim G.-H., Doh J.-M., Kwun S.-I. et al. Growth behavior and microstructure of oxide scales grown on WSi_2 coating // Intermetallics. 2008. V 16, N 3. P. 360–372.
4. Stoetzel J., Schneider T., Mueller M. M., Kleebe H. J., Wiggers H., Schiering G., Schmechel R. Microstructure and thermoelectric properties of Si– WSi_2 nanocomposites // Acta Materialia. 2017. V. 125. P. 321–326.
5. Chanadee T., Wannasin J., Niyomwas S. Synthesis of WSi_2 and W_2B intermetallic compound by in-situ self propagating high-temperature synthesis reaction // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2014. V. 122, N 1426. P. 496–501.
6. Pan Y., Jing C., Wu Y.P. The structure, mechanical and electronic properties of WSi_2 from first-principles investigations // Vacuum. 2019. V. 167. P. 374–381.
7. Chang H.Q., Zhang G.H. A novel green strategy for the preparation of ultrafine-grained WSi_2 and W_5Si_3 powders // Ceramics International. 2022. V. 48. № 21. P. 31880–31889.
8. Zhang Y., Cui K., Fu T., Wang J., Qie J. Synthesis WSi_2 coating on W substrate by HDS method with various deposition times // Applied Surface Science. 2020. V. 511. P. 145551.
9. Li C., Niu Y.R., Liu T., Zhao J., Zheng X.B., Ding C.X. Oxidation Resistance of ZrB_2 -SiC- WSi_2 Coating Prepared by Vacuum Plasma Spraying // Solid State Phenomena. 2018. P. 281. P. 522–527.
10. Zhai C., Niu Y., Huang L., Pan H., Li H., Zheng X., Sun J. Microstructure characteristics and oxidation behavior of vacuum plasma sprayed tungsten disilicide coating // Ceramics International. 2016. V. 42, N 16. P. 18798–18805.
11. Zhang G., Sun J., Fu Q. Microstructure and oxidation behavior of plasma sprayed WSi_2 -mullite- $MoSi_2$ coating on niobium alloy at 1500 °C // Surface and Coatings Technology. 2020. V. 400. P. 126210.
12. Катинас Э., Янкаускас В., Казак Н., Михайлов В. Повышение абразивной износостойкости стали Hardox 400 электроискровым легированием поверхности // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 1. С. 128–135.
13. Антипов М.С., Бажин П.М., Константинов А.С., Чижиков А.П., Жидович А.О., Столин А.М. Структура, механические и трибологические свойства композиционных покрытий на основе Ti–Cr–C–Ni–Fe // Физическая мезомеханика. 2023. Т. 26, № 4. С. 117–128.
14. Pyachin S.A., Burkov A.A. Formation of intermetallic coatings by electrospark deposition of titanium and aluminum on a steel substrate // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015. V. 51. P. 118–124.
15. Пячин С.А., Бурков А.А., Власова Н.М., Кириченко Е.А. Влияние добавок оксидов и карбидов металлов на свойства интерметаллидных Ti_3Al электроискровых покрытий // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13, № 2. С. 168–173.
16. Бурков А.А. Осаждение покрытий из металлического стекла электроискровой обработкой в среде гранул состава $Fe_{39}Ni_{8}Cr_{7}W_{7}Mo_{7}Co_{2}C_{16}B_{14}$ // Письма о материалах. 2017. Т. 7, № 3. С. 254–259.
17. Burkov A.A., Kulik M.A. Wear-resistant and anticorrosive coatings based on chrome carbide Cr_7C_3 obtained by electric spark deposition // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2020. V. 56. P. 1217–1221.
18. Burkov A.A., Kulik M.A., Krutikova V.O. Electrospark deposition of tungsten carbide powder on titanium alloy Ti6Al4V // Letters on Materials. 2021. V. 11, N 2. P. 175–180.
19. Burkov A.A., Chigrin P. G., Dvornik M. I. Electrospark CuTi coatings on titanium alloy Ti6Al4V: Corrosion and wear properties // Surface and Coatings Technology. 2023. Т. 469. P. 129796.
20. Kwok D.Y., Neumann A.W. Contact angle measurement and contact angle interpretation // Advances in colloid and interface science. 1999. V. 81, N 3. P. 167–249.
21. Кудряшов А.Е., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Муканов С.К., Петржик М.И., Левашов Е.А. Особенности массопереноса, структура и свойства электроискровых покрытий, сформированных на никельсодержащем СЛС сплаве при использовании электродов из циркония // Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка. 2022. С. 557–560.
22. Бурков А.А., Кулик М.А., Беля А.В., Крутикова В.О. Электроискровое осаждение порошка диборида хрома на нержавеющую сталь AISI 304 // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2022. Т. 24, № 2. С. 78–90.
23. Чумакова Л.С., Бакулин А.В., Кулькова С.Е. Электронная структура и механические свойства Ti_5Si_3 // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2022. Т. 161, № 6. С. 874–886.

24. Gambino J.P., Cunningham B., DeHaven P., Adams E.D. Reaction of Ti with WSi_2 // *Journal of applied physics*. 1997. V. 82, N 12. P. 6073–6077.

25. Бурков А.А., Крутикова В.О., Быцур А.Ю., Хе В.К. Ti–Cr–Cu электроискровые покрытия на стали Ст3 // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2023. № 1. С. 93–104.

26. Прибытков Г.А., Криницын М.Г., Коржова В.В. Синтез и структура СВС композитов Ti_5Si_3+Ti связка // *Химическая физика и мезоскопия*. 2020. Т. 22, № 3. С. 269–280.

27. Li Y.C., Zhang W.W., Wang Y., Zhang X.Y., Sun L.L. Effect of spray powder particle size on the bionic hydrophobic structures and corrosion performance of Fe-based amorphous metallic coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 437. P. 128377.

28. Crespo-Villegas J., Cavarroc M., Knittel S., Martinu L., Klemberg-Sapieha J.E. Protective Ti_xSi_y coatings for enhanced oxidation resistance of the γ -TiAl alloy at 900 °C // *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 430. P. 127963.

Информация об авторах

А. А. Бурков – кандидат физико-математических наук Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

М. А. Кулик – младший научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

А. Ю. Быцур – младший научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

References

1. Murthy, T. C., Sonber, J. K., Subramanian, C., Hubli, R. C. & Suri, A. K. (2012). Densification, characterization and oxidation studies of TiB_2 - WSi_2 composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 33, 10–21.

2. Wang, S., Pan, Y. & Lin, Y. (2018). First-principles study of the effect of Cr and Al on the oxidation resistance of WSi_2 . *Chemical Physics Letters*, 698, 211–217.

3. Kim, H.-S., Yoon, J.-K., Kim, G.-H., Doh, J.-M. & Kwun, S.-I. et al. (2008). Growth behavior and microstructure of oxide scales grown on WSi_2 coating. *Intermetallics*, 16(3), 360–372.

4. Stoetzel, J., Schneider, T., Mueller, M. M., Kleebe, H. J., Wiggers, H., Schierning, G. & Schmechel, R. (2017). Microstructure and ther-

moelectric properties of Si- WSi_2 nanocomposites. *Acta Materialia*, 125, 321–326.

5. Chanadee, T., Wannasin, J. & Niyomwas, S. (2014). Synthesis of WSi_2 and W_2B intermetallic compound by in-situ self propagating high-temperature synthesis reaction. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 122(1426), 496–501.

6. Pan, Y., Jing, C. & Wu, Y. P. (2019). The structure, mechanical and electronic properties of WSi_2 from first-principles investigations. *Vacuum*, 167, 374–381.

7. Chang, H. Q. & Zhang, G. H. (2022). A novel green strategy for the preparation of ultrafine-grained WSi_2 and W_5Si_3 powders. *Ceramics International*, 48(21), 31880–31889.

8. Zhang, Y., Cui, K., Fu, T., Wang, J. & Qie, J. (2020). Synthesis WSi_2 coating on W substrate by HDS method with various deposition times. *Applied Surface Science*, 511, 145551.

9. Li, C., Niu, Y. R., Liu, T., Zhao, J., Zheng, X. B. & Ding, C. X. (2018). Oxidation Resistance of ZrB_2 -SiC- WSi_2 Coating Prepared by Vacuum Plasma Spraying. *Solid State Phenomena*, 281, 522–527.

10. Zhai, C., Niu, Y., Huang, L., Pan, H., Li, H., Zheng, X. & Sun, J. (2016). Microstructure characteristics and oxidation behavior of vacuum plasma sprayed tungsten disilicide coating. *Ceramics International*, 42(16), 18798–18805.

11. Zhang, G., Sun, J. & Fu, Q. (2020). Microstructure and oxidation behavior of plasma sprayed WSi_2 -mullite- $MoSi_2$ coating on niobium alloy at 1500° C. *Surface and Coatings Technology*, 400, 126210.

12. Katinas, E., Jankauskas, V., Kazak, N. & Michailov, V. (2019). Improving abrasive wear resistance for steel Hardox 400 by electro-spark deposition. *Journal of Friction and Wear*, 40, 100–106.

13. Antipov, M. S., Bazhin, P. M., Konstantinov, A. S., Chizhikov, A. P., Zhidovich, A. O. & Stolin, A. M. (2023). Structure, and Mechanical and Tribological Properties of Ti–Cr–C–Ni–Fe Composite Coatings. *Physical Mesomechanics*, 26(6), 691–700.

14. Pyachin, S. A. & Burkov, A. A. (2015). Formation of intermetallic coatings by electrospark deposition of titanium and aluminum on a steel substrate. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 51, 118–124.

15. Pyachin, S. A., Burkov, A. A., Vlasova, N. M. & Kirichenko, E. A. (2016). Vliyaniye dobavok

- oksidov i karbidov metallov na svoystva intermetallidnykh Ti_3Al elektroiskrovykh pokrytiy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 13(2), 168–173. (In Russ.).
16. Burkov, A. A. (2017). Deposition of metallic glass coatings by electrospark processing in the medium of granules of Fe₃₉Ni₈Cr₇W₇Mo₇Co₂C₁₆B₁₄ composition. *Letters on materials*, 7(3), 254–259. (In Russ.).
17. Burkov, A. A. & Kulik, M. A. (2020). Wear-resistant and anticorrosive coatings based on chrome carbide Cr₇C₃ obtained by electric spark deposition. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 56, 1217–1221.
18. Burkov, A. A., Kulik, M. A. & Krutikova, V. O. (2021). Electrospark deposition of tungsten carbide powder on titanium alloy Ti6Al4V. *Letters on Materials*, 11(2), 175–180. (In Russ.).
19. Burkov, A. A., Chigrin, P. G., Dvornik, M. I. (2023). Electrospark CuTi coatings on titanium alloy Ti6Al4V: Corrosion and wear properties. *Surface and Coatings Technology*, 469, 129796.
20. Kwok, D. Y. & Neumann, A. W. (1999). Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in colloid and interface science*, 81(3), 167–249.
21. Kudryashov, A. E., Kiryukhantsev-Korneyev, F. V., Mukanov, S. K., Petrzhih, M. I. & Levashov, E. A. (2022). Osobennosti massoprenosa, struktura i svoystva elektroiskrovykh pokrytiy, sformirovannykh na nikel'soderzhashchem SLS splave pri ispol'zovanii elektrodov iz tsirkoniya. *Novyye materialy i tekhnologii: Poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye materialy, zashchitnyye pokrytiya, svarka*, 557–560. (In Russ.).
22. Burkov, A. A., Kulik, M. A., Belya, A. V. & Krutikova, V. O. (2022). Electrospark deposition of chromium diboride powder on stainless steel AISI 304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 24(2), 78–90. (In Russ.).
23. Chumakova, L. S., Bakulin, A.V. & Kul'kova, S. E. (2022). Elektronnaya struktura i mekhanicheskiye svoystva Ti₅Si₃. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*, 161(6), 874–886. (In Russ.).
24. Gambino, J. P., Cunningham, B., DeHaven, P. & Adams, E. D. (1997). Reaction of Ti with WSi₂. *Journal of applied physics*, 82(12), 6073–6077.
25. Burkov, A. A., Krutikova, V. O., Bytsura, A. Yu. & Khe, V. K. (2023). Ti–Cr–Cu electrospark coatings on steel St3. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, (1), 93–104.
26. Pribytkov, G. A., Krinitsyn, M. G. & Korzhova, V. V. (2020). Sintez i struktura SVS kompozitov Ti₅Si₃+Ti svyazka. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 22(3), 269–280. (In Russ.).
27. Li, Y. C., Zhang, W. W., Wang, Y., Zhang, X. Y. & Sun, L. L. (2022). Effect of spray powder particle size on the bionic hydrophobic structures and corrosion performance of Fe-based amorphous metallic coatings. *Surface and Coatings Technology*, 437, 128377.
28. Crespo-Villegas, J., Cavarroc, M., Knittel, S., Martinu, L. & Klemberg-Sapieha, J. E. (2022). Protective Ti_xSi_y coatings for enhanced oxidation resistance of the γ -TiAl alloy at 900 °C. *Surface and Coatings Technology*, 430, 127963.

Information about the authors

A. A. Burkov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Staff Scientist, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS.

M. A. Kulik – Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS.

A. Yu. Bytsura – Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS.

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

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; одобрена после рецензирования 29.04.2024; принята к публикации 02.05.2024.

The article was received by the editorial board on 04 Apr. 24; approved after reviewing 29 Apr. 24; accepted for publication 02 May 24.