

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

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

УДК 621.762; 62-408.2

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.010

ОДНОСТАДИЙНОЕ ОСАЖДЕНИЕ Ti–Cu ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti6Al4V АНОДОМ ИЗ МЕДНЫХ И ТИТАНОВЫХ ГРАНУЛ

Александр Анатольевич Бурков

Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН, ул. Тихоокеанская 153, 680042, Хабаровск, Россия
burkovalex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

Аннотация. В настоящее время титано-медные покрытия привлекли большое внимание исследователей в области модификации поверхности промышленных и биомедицинских материалов из-за их превосходных механических свойств и биосовместимости. Приготовление интерметаллидного Ti–Cu покрытия осуществлялось методом электроискровой обработки в эквимолярной смеси гранул из электротехнической меди М0 и титанового сплава ВТ1-00. По данным энергодисперсионного анализа средняя концентрация меди и титана в покрытии составляла 30 и 70 ат. %, соответственно. По данным рентгенофазового анализа в структуре покрытия обнаружены интерметаллиды: CuTi₃, CuTi, Cu₄Ti₃ благодаря которым микротвердость покрытия достигала 498,5 НВ. Средняя толщина покрытия составила 43,7 мкм. Микроструктура покрытия представлена равноосными зёрнами диаметром 70-500 нм. Угол контакта с водой для Ti–Cu покрытия на 24 % больше чем у исходного сплава. Ti–Cu покрытие позволяет повысить жаростойкость титанового сплава Ti6Al4V в 1,3 раза. Приведенная величина износа покрытия составила 0,67·10⁵ мм³/Нм. Применение электроискровых Cu–Ti покрытий позволяет повысить интенсивность изнашивания поверхности сплава Ti6Al4V в 11 раз. Сочетание окислительного и абразивного износа было механизмом изнашивания Ti–Cu покрытия, в то время как адгезионный износ был более характерен для сплава Ti6Al4V.

Ключевые слова: электроискровое легирование, Ti6Al4V, Ti–Cu покрытие, износ, микротвердость, смазываемость, коэффициент трения, жаростойкость.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-23-00032.

Для цитирования: Бурков А.А. Одностадийное осаждение Ti–Cu покрытия электроискровой обработкой титанового сплава Ti6Al4V анодом из медных и титановых гранул // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 372–380. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.010.

Original article

ONE-STAGE DEPOSITION OF Ti–Cu COATINGS BY ELECTRIC SPARK TREATMENT OF Ti6Al4V TITANIUM ALLOY WITH AN ANODE OF COPPER AND TITANIUM GRANULES

Alexander A. Burkov

Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of sciences, 153 Tikhookeanskaya, Khabarovsk, 680042, Russia
burkovalex@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-4669>

Abstract. Currently, copper-titanium coatings have attracted a lot of attention from researchers in the field of surface modification of industrial and biomedical materials due to their excellent mechanical properties and biocompatibility. The preparation of the intermetallic Ti–Cu coating was carried out by electrospark deposition in an

equimolar mixture of granules from electrical copper M0 and titanium alloy VT1-00. According to the energy dispersive analysis data, the average concentration of copper and titanium in the coating was 30 and 70 at. %, respectively. According to X-ray phase analysis, intermetallic compounds were found in the coating structure: CuTi₃, CuTi, Cu₄Ti₃ due to which the microhardness of the coating reached 498.5 HV. The average coating thickness is 43.7 μm. The microstructure of the coating is represented by equiaxed grains with a diameter of 70-500 nm. The water contact angle for the Ti–Cu coating is 24 % greater than that of the original alloy. The Ti–Cu coating makes it possible to increase the oxidation resistance of Ti6Al4V titanium alloy by 1.3 times. The wear rate of the coating was 0.67·10⁵, mm³/Nm. The use of Ti–Cu electrospark coatings makes it possible to decrease the wear rate of the Ti6Al4V alloy surface by 11 times. A combination of oxidative and abrasive wear was the wear mechanism of the Ti–Cu coating, while adhesive wear was more characteristic for the Ti6Al4V alloy.

Keywords: electrospark deposition, Ti6Al4V, Ti–Cu coating, wear, microhardness, wettability, coefficient of friction, oxidation resistance.

Acknowledgements: The work was performed according by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-23-00032.

For citation: Burkov, A. A. (2023). One-stage deposition of Ti–Cu coatings by electric spark treatment of Ti6Al4V titanium alloy with an anode of copper and titanium granules. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 372–380. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.010.

Введение

Ti–Cu сплавы в основном используются для изготовления высокопрочных проводящих пружин, диафрагм, а также коррозионноустойчивых и износостойких материалов благодаря их высокому пределу прочности на разрыв более 700 МПа, высокой твердости до 550 HV, хорошей обрабатываемости и свойствам релаксации напряжений [1-2]. Кроме того, Ti–Cu сплавы могут стать удачной альтернативой Cu–Be сплавам, которые используются для электронных компонентов, таких как реле и разъемы [3].

На сегодняшний день известны следующие интерметаллидные соединения меди и титана: α-Cu₄Ti, β-Cu₄Ti, Cu₃Ti, Cu₂Ti, Cu₃Ti₂, Cu₄Ti₃, CuTi, CuTi₂ и CuTi₃, причем их твердость значительно различается. Так для соединения CuTi₂, она составляет 746,9 ± 67,7 HV, а для CuTi всего 298,2 ± 20,7 HV [4].

В работе [5] Ti–Cu листы приготавливали методом холодной прокатки с последующей термической обработкой. Объемные Ti–Cu материалы изготавливают длительной плавкой смеси медного и титанового порошков при температуре 1200 °C [4]. Ti–Cu сплавы обладают устойчивой антибактериальной активностью при содержании меди ≥5 вес. %, и благодаря этому рассматриваются в качестве кандидатов в пластической хирургии и стоматологии, как альтернатива бериллиевой бронзе [6].

В статье [7] Ti–Cu покрытие было получено плазменным напылением механически смешанных Cu и Ti порошков, однако оно имело

чередующуюся ламинированную структуру микронного размера из слоев меди и титана. В работе [8] показана высокая антибактериальная активность Ti–Cu PVD покрытий на нержавеющей стали AISI316. Ti–Cu покрытия могут использоваться в качестве промежуточного слоя, при сварке титанового сплава с нержавеющей сталью [9]. Однако в целом, на сегодняшний день наблюдается недостаток работ по Ti–Cu покрытиям и исследованию их свойств.

Технология электроискрового легирования (ЭИЛ) является одной из наиболее простых и эффективных для создания покрытий на металлических материалах [10]. При электроискровой обработке анод подвергается электрической эрозии под действием электрических разрядов, этот материал переносится на катод и образует покрытие, металлургически связанное с подложкой за счет конвективного смешения анодного и катодного материалов [11]. Метод ЭИЛ нелокализованным электродом был предложен для автоматизации ЭИЛ даже при обработке криволинейных поверхностей [12]. Автоматизация в технологии ЭИЛ снижает вмешательство человека в процессы осаждения за счет заранее заданных критериев принятия решений [13]. Он основан на использовании гранул в качестве источника материала для формирования поверхностного слоя. Образец (катод) погружается в слой гранул (анод), окружающих его со всех сторон. Этот прием позволяет формировать покрытие одновременно по всей поверхности подложки, контактирующей с

гранулами. Ранее мы показали, что ЭИЛ позволяет осаждать интерметаллические Ti–Al покрытия с использованием смеси гранул титана и алюминия [14]. Цель настоящей работы заключается в исследовании применимости электроискрового легирования нелокализованным электродом из медных и титановых гранул, для нанесения Ti–Cu покрытия на титановый сплав Ti6Al4V и изучение его структуры, смачиваемости, коррозионных и триботехнических свойств.

Материалы и методы

Приготовление интерметаллидного Ti–Cu покрытия осуществлялось методом электроискровой обработки в эквимолярной смеси гранул из электротехнической меди М0 и титанового сплава ВТ1-00. Гранулы были изготовлены в форме цилиндров длиной 4 ± 1 мм из прутков диаметром $4 \pm 0,2$ мм. Покрытие наносилось на подложку из сплава Ti6Al4V в форме цилиндров высотой 10 мм и диаметром 12 мм. Подложка закреплялась на вращающемся титановом стержне в центре металлического контейнера, а оставшееся пространство заполнялось анодной смесью. Титановый контейнер с приводом от электродвигателя расположен под углом 35° к горизонту. Положительный вывод от генератора подавался на контейнер, а отрицательный – на подложку. При прохождении разрядов контейнер вращался со скоростью 60 об/мин, а катод-подложка вращалась с аналогичной скоростью в противоположном направлении. Прямоугольные импульсы разрядного тока имели среднюю амплитуду 110 А при напряжении 30 В. Длительность импульса составляла 100 мкс, частота повторения – 1 кГц. Общая продолжительность ЭИЛ составляла 12 минут. В рабочий объем контейнера вводился защитный газ (аргон) с расходом 10 л·мин⁻¹. Перед нанесением покрытия анодная смесь была приработана в течение 120 минут для формирования вторичной структуры на поверхности гранул.

Прирост массы катода при ЭИЛ изучали периодическим взвешиванием на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Для повышения точности измерений продукты электроэрозии отделяли от гранул просеиванием через сито с ячейкой 1,6 мм. Фазовый состав образца исследовали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 с Cu-K α -излучением. Линии рентгенодифракционного спектра идентифицировали по

базе данных PDF-2. Микрорельеф поверхности и элементный состав образца изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Vega 3 LMH (Tescan, Чехия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (EDS) X-max 80 (Oxford Instruments). Шероховатость покрытия была измерена на профилометре TR 200 на участке длиной 3 мм. Твердость покрытия по Виккерсу измеряли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузках 0,3 Н, 1 Н, 3 Н и выдержке 12 с. Износостойкость покрытия исследовали по ASTM G99-17 при сухом трении скольжения со скоростью 0,47 мс⁻¹, при нагрузке 25 Н, в течение 10 минут, с использованием контртела, в виде диска из быстрорежущей стали P6M5, твердостью 60 HRC. Для обеспечения воспроизводимости результатов были протестированы три образца и рассчитано стандартное отклонение.

Испытания на стойкость к окислению проводили в муфельной печи при температуре 900 °С на воздухе. Общее время испытаний составило 100 часов. Образцы выдерживали при заданной температуре ~ 6 ч, затем извлекали и охлаждали в эксикаторе до комнатной температуры. В ходе испытаний все образцы помещались в корундовый тигель для учета массы расплывшихся оксидов. Изменение массы всех образцов измеряли с помощью весов с чувствительностью 0,1 мг. Измерение краевого угла смачивания проводилось согласно методу сидячей капли [15].

Результаты и обсуждение

Изучение массопереноса при ЭИЛ имеет важное значение для установления факта положительного привеса катода, а в противном случае ЭИЛ не эффективно. А, во-вторых, толщину ЭИЛ покрытий рассматривают как функцию от привеса катода [16]. В процессе ЭИЛ между гранулами и подложкой возникали электрические разряды, приводящие к жидкофазному переносу металла с поверхности Ti и Cu гранул на подложку из сплава Ti6Al4V, сопровождавшемуся монотонным увеличением массы катода. Скорость привеса катода монотонно снижалась с ростом времени обработки, что характерно для ЭИЛ. Максимальный привес катода за 12 минут составил $1,16 \pm 0,61$ мг·см². Средняя толщина осажденного Ti–Cu покрытия 43,7 мкм.

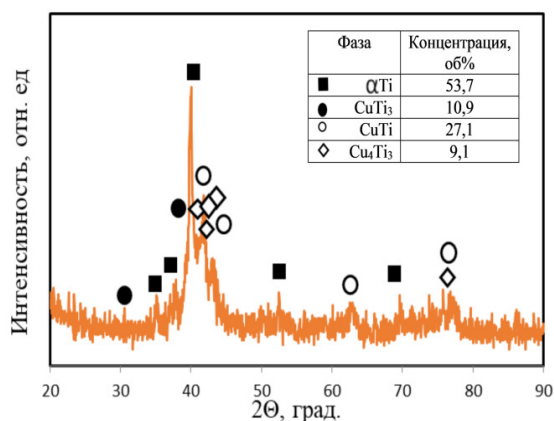


Рис.1. Результаты рентгенофазового анализа покрытия

Fig.1. X-ray patterns of coating

Результаты рентгенофазового анализа (рис.1) показывают, что в составе покрытий помимо исходных титана и меди наблюдаются интерметаллидные соединения CuTi₃, CuTi, Cu₄Ti₃. В работе [14] были приготовлены Ti–Al покрытия электроискровой обработкой в смеси гранул из титана и алюминия, и также было отмечено присутствие смеси фаз интерметаллидов и исходных металлов. На рис.2а изображено Ti–Cu покрытие в поперечном сечении. Структура покрытия содержит редкие мельчайшие поры и поперечные трещины. Возникновение пор при ЭИЛ принято объяснять испарением материала электродов в условиях высоких температур низковольтного электрического

разряда, поскольку газовый пузырь не успевает выйти на поверхность микрованны расплава из-за высокой скорости охлаждения материала после окончания разряда [17]. Поперечные трещины возникают из-за различий в коэффициентах теплового расширения покрытия и подложки в условиях высокой скорости охлаждения материала. Покрытие металлургически связано со сплавом Ti6Al4V, а граница раздела не содержит пор и продольных трещин. Этот факт свидетельствует о хорошей адгезии слоя Ti–Cu к подложке. Микроструктура покрытия представлена равноосными темно-серыми зёрнами диаметром 70–500 нм, погруженными в светлую матрицу (рис.2б). Вероятно, они представляют собой кристаллиты интерметаллидов, тогда как матрица обогащена медью. По данным энергодисперсионного анализа (рис.3) средняя концентрация титана в покрытии (70 ат. %) выше по сравнению с медью (30 ат. %). Это можно объяснить переносом титана как с подложки, и в меньшей степени с поверхности титанового контейнера, что подтверждается предыдущими исследованиями [14]. Средняя шероховатость покрытия составила $6,9 \pm 0,9$.

Известно, что более низкий краевой угол смачивания водой (УСВ) обычно соответствует более высокой биологической активности поверхности, которая играет важную роль в определении гистосовместимости биоматериалов [8].

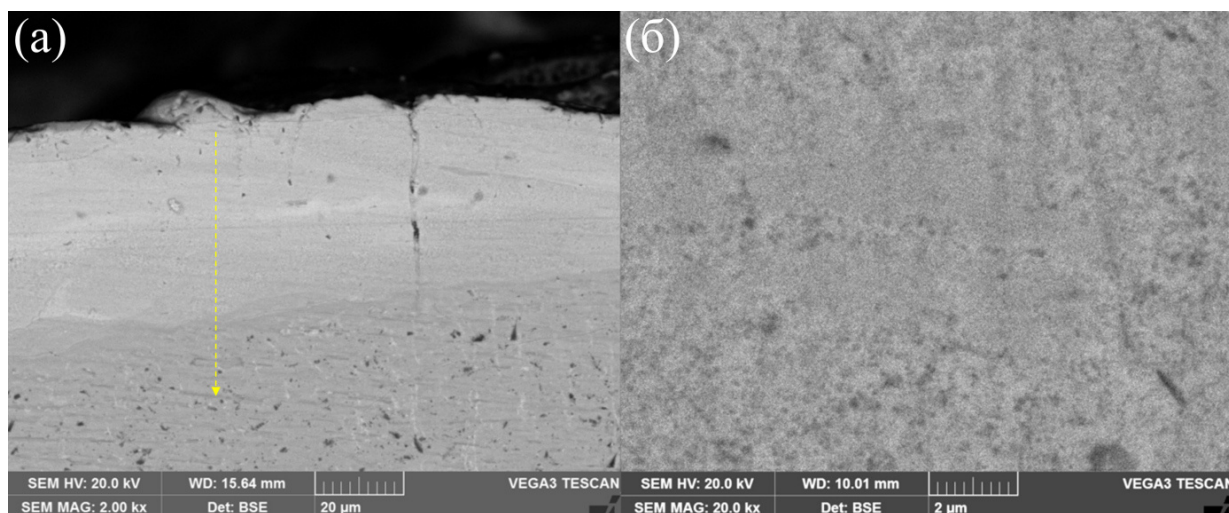


Рис.2. СЭМ изображения поперечного сечения Ti–Cu покрытия при увеличениях 2kX (а), 20kX (б)

Fig.2. SEM images of the cross section of the Ti–Cu coating at magnifications of 2kX (a), 20kX (b)

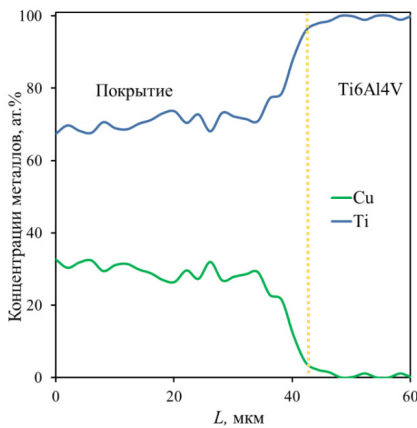


Рис.3. Распределение элементов к Рис.2а, согласно ЭДС анализу

Fig.3. Distribution of elements to Fig.2a, according to EDS analysis

На рис.4 показан УСВ Ti–Cu покрытия и сплава Ti6Al4V при температуре 20 °C равны 71,1° и 57,5°, соответственно. В статье [18] сообщили, что биоматериалы с углами смачивания более 80° могут быть классифицированы как гидрофобные, и такие поверхности могут препятствовать прикреплению клеток. К примеру, широко используемый в ортопедии высокомолекулярный полиэтилен (UHMWPE) имеет УСВ 103°, и поэтому много исследований направлено на его снижение [19]. Тогда как поверхности с УСВ в диапазоне примерно 40-80° проявляют адгезионные свойства (относительно высокое прикрепление клеток). Таким образом, Ti–Cu покрытие на 24 % более гидрофобное, чем Ti6Al4V сплав, но ниже допустимого уровня в 80° и может проявлять адгезионные свойства с биологическими клетками.

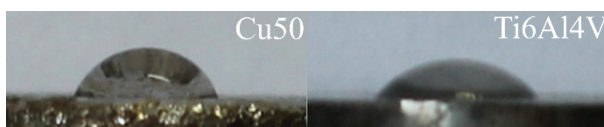


Рис.4. Смачиваемость поверхности Ti–Cu покрытия и сплава Ti6Al4V

Fig.4. Wettability of the surface of the Ti–Cu coating and Ti6Al4V alloy

Данные о потенциодинамической поляризации Ti–Cu покрытия и сплава Ti6Al4V получены в 3,5 % растворе NaCl при 20 °C. Потенциал коррозии (E_{corr}) Ti–Cu покрытия составил –0,68 В относительно Ag/AgCl. Это свидетельствует о том, что Ti–Cu покрытие облагораживает поверхность сплава Ti6Al4V (–0,73 В) и между покрытием и подложкой может возник-

нуть гальваническая коррозия, т. е. подложка может подвергнуться анодной коррозии. Плотность тока коррозии (I_{corr}) определяет скорость коррозии образцов с покрытием. Несмотря на более высокий E_{corr} , плотность ток коррозии Ti–Cu покрытия (10,85 мкА/см²) был значительно выше, чем у сплава Ti6Al4V (2,64 мкА/см²). Это объясняется наличием барьерного слоя TiO на поверхности сплава Ti6Al4V, тогда как медь не формирует плотных оксидных слоев.

На рис.5 показаны результаты циклических испытаний Ti–Cu покрытия на жаростойкость при температуре 900 °C. Он показывает, что покрытие имело более высокую жаростойкость по сравнению со сплавом Ti6Al4V. В целом, за 100 часов испытаний Ti–Cu покрытие позволяет повысить жаростойкость титанового сплава Ti6Al4V в 1,3 раза. На рисунок 5 для сравнения добавлено металлокерамическое покрытие на основе карбида вольфрама. Скорость его окисления была близка к сплаву без покрытия. Это показывает, что Ti–Cu покрытие лучше защищает титановый сплав от высокотемпературного окисления по сравнению карбидом вольфрама.

Увеличение массы образцов при высокотемпературном окислении в основном связано с образованием рутила ($rTiO_2$). По данным рентгенофазового анализа, на поверхности Ti–Cu образца после испытания на циклическое окисление также наблюдались брукит ($bTiO_2$) и титанат меди (II).

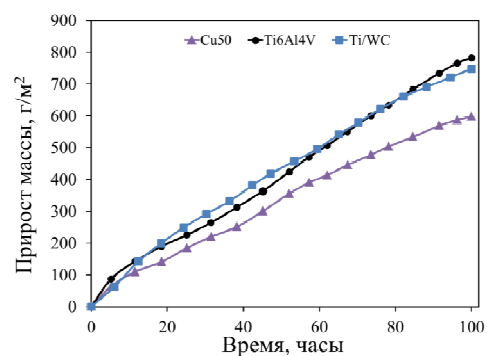


Рис.5. Жаростойкость образца Ti–Cu в сравнении со сплавом Ti6Al4V и Ti/WC покрытием при 900 °C

Fig.5. Cyclic oxidation resistance of Ti–Cu sample as compared alloy Ti6Al4V and Ti/WC coating at 900 °C

Результаты испытания поверхности медно-титанового покрытия на микротвердость в зависимости от прилагаемой нагрузки показаны на рис.6. Из него следует, что величина твердо-

сти осажденного покрытия изменялась от 433,7 HV до 498,5 HV, тогда как у сплава Ti6Al4V от 129,2 HV до 239,1 HV. Максимальная величина твердости покрытия была зафиксирована при нагрузке 0,98 Н.

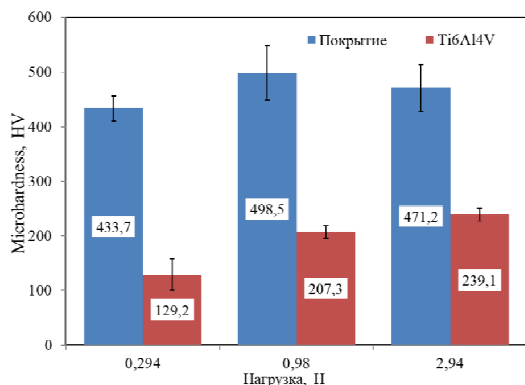


Рис.6. Микротвердость Ti–Cu покрытия по сравнению со сплавом Ti6Al4V без покрытия
Fig.6. Microhardness of Ti–Cu coatings as compared to uncoated Ti6Al4V alloy

Таким образом, твердость Ti–Cu покрытия была выше в 2,0-3,4 раза, чем у сплава Ti6Al4V. Это объясняется присутствием в покрытии относительно твердых интерметаллидных соединений, в виде равноосных зерен, оказывающих дисперсное упрочнение титановой матрицы покрытия. Полученное Ti–Cu покрытие можно классифицировать как металломатричный композит.

Результаты трибологических испытаний Ti–Cu покрытия в режиме сухого скольжения показали, что коэффициент трения осажденного покрытия составил 0,86, что выше, чем у непокрытого сплава Ti6Al4V (0,57). Несмотря на более высокий коэффициент трения, интенсивность изнашивания Ti–Cu покрытия составила 0,67 мм³/Нм, что в 11 раз ниже, чем у исходного сплава Ti6Al4V (7,5 мм³/Нм).

На рис.7 показаны СЭМ изображения следов износа Ti–Cu покрытия (рис.7а) и сплава Ti6Al4V (рис.7в).

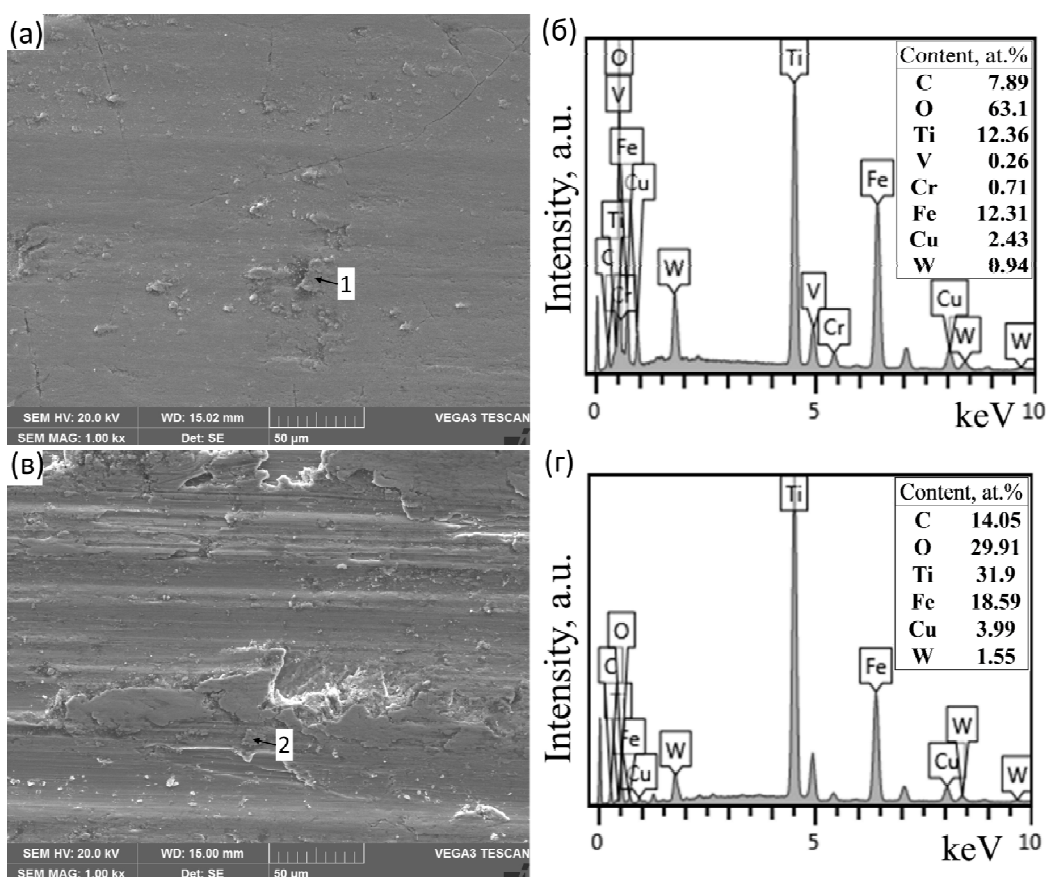


Рис.7. СЭМ изображения вида изношенной поверхности Ti–Cu покрытия (а) после испытания на износ по сравнению со сплавом Ti6Al4V (в). Данные ЭДС анализа покрытия (б) и сплава Ti6Al4V (г), соответствующие участкам 1 и 2 на рис.а и в

Fig.7. SEM images of worn surface view of (a) Ti–Cu coating and (c) Ti6Al4V after wear test. EDS analysis data of coating (b); and (d) alloy Ti6Al4V, corresponding to areas are marked 1 and 2 in fig. a and c

Изношенная поверхность Ti–Cu покрытия была значительно более гладкой по сравнению со сплавом Ti6Al4V. На изношенной поверхности покрытия наблюдаются узкие царапины. На поверхности сплава Ti6Al4V наблюдаются широкие канавки износа и царапины, образовавшиеся в результате вспахивания при абразивном износе. Ямки, образовавшиеся в результате отслаивания, и сильная деформация указывают на адгезионный износ. Хлопья износа, выявленные на поверхности покрытий и сплава Ti6Al4V, по данным ЭДС анализа содержат значительное количество кислорода и поэтому представляют собой скопления оксидов, свидетельствующие об окислительном износе [20]. Хлопья содержат Fe, W и Cr (рис.7), перешедшие на поверхность покрытия в результате интенсивного износа контртела из быстрорежущей стали М45. Таким образом, сочетание окислительного и абразивного износа было основным механизмом изнашивания Ti–Cu покрытия, в то время как адгезионный износ был более характерен для сплава Ti6Al4V.

Выводы

Методом ЭИЛ впервые получено Ti–Cu покрытие на Ti6Al4V сплаве в смеси гранул из электротехнической меди М0 и титанового сплава ВТ1-00. Максимальный привес катода за 12 минут составил $1,16 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$. Средняя толщина осажденного Ti–Cu покрытия составила $43,7 \text{ мкм}$.

В структуре покрытий помимо титана и меди были обнаружены интерметаллидные соединения: CuTi_3 , CuTi , Cu_4Ti_3 . По данным энергодисперсионного анализа средняя концентрация титана в покрытии (70 ат. %) превышает концентрацию меди (30 ат. %). Угол контакта с водой для Ti–Cu покрытия равен $71,1^\circ$, на 24 % больше чем у исходного сплава.

Ti–Cu покрытие позволяет повысить жаростойкость титанового сплава Ti6Al4V в 1,3 раза. Нанесение Ti–Cu покрытия позволяет повысить поверхностную твердость титанового сплава Ti6Al4V более чем в два раза. Коэффициент трения нанесенного покрытия выше, чем у непокрытого сплава в 1,5 раза. Интенсивность изнашивания Ti–Cu покрытия ниже, чем у исходного сплава Ti6Al4V в 11 раз. Сочетание окислительного и абразивного износа было механизмом изнашивания покрытия Ti–Cu, в то время как адгезионный износ был более характерен для сплава Ti6Al4V.

Список литературы

1. Karakulak E. Characterization of Cu-Ti powder metallurgical materials // *Int. J. Min. Met. Mater.* 2017. V. 24, N 1. P. 83–90.
2. Kondo S.-I., Nakashima H., Morimura T. On the solid solubility extension by rapid quenching and spinodal decomposition during aging in melt-spun CuTi alloys // *Materials Transaction.* 2019. V. 60. P. 338–345.
3. Semboshi S., Kaneno Y., Takasugi T., Han S.Z., Masahashi N. Effect of composition on the strength and electrical conductivity of Cu-Ti binary alloy wires fabricated by aging and intense drawing // *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2019. V. 50, N 3. P. 1389–1396.
4. Fan Y., Fan J., Wang C. Wang Formation of typical Ti–Cu intermetallic phases via a liquid-solid reaction approach // *Intermetallics.* 2019. V. 113. P. 106577.
5. Kim Y.K., Pouraliakbar H., Hong S.I. Effect of interfacial intermetallic compounds evolution on the mechanical response and fracture of layered Ti/Cu/Ti clad materials // *Materials Science and Engineering: A.* 2020. V. 772. P. 138802.
6. Cao S., Zhang Z.-M., Zhang J.-Q., Qin G.-W., Zhang E.-L. Improvement in antibacterial ability and cell cytotoxicity of Ti–Cu alloy by anodic oxidation // *Rare Metals.* 2022. V. 41, N 2. P. 594–609.
7. Tian J., Xu K., Hu J., Zhang S., Cao G., Shao G. Durable self-polishing antifouling Cu–Ti coating by a micron-scale Cu/Ti laminated microstructure design // *Journal of Materials Science and Technology.* 2021. V. 79. P. 62–74.
8. Jin X., Gao L., Liu E., Yu F., Shu X., Wang H. Microstructure, corrosion and tribological and antibacterial properties of Ti-Cu coated stainless steel // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials.* 2015. V. 50. P. 23–32.
9. Elmi Hosseini S.R., Feng K., Nie P., Zhang K., Huang J., Li Z., Kokawa H., Guo B., Xue S. Enhanced Strength of 304 SS-Ti6Al4V Laser-Welded Joints Containing Composite Interlayers // *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2018. V. 27. P. 6135–6148.
10. Бурков А.А., Быцур А.Ю. Коррозионные свойства и трибологическое поведение покрытий из карбида вольфрама с алюминидной матрицей на нержавеющей стали AISI304 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* 2022. Т. 19, № 4. С. 509–519.
11. Shafyei H., Salehi M., Bahrami A. Fabrication, microstructural characterization and me-

chanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB₂ composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method // *Ceramics International*. 2020. V. 46, N 10. P. 15276–15284.

12. Burkov A.A., Pyachin S.A. Formation of WC–Co coating by a novel technique of electro-spark granules deposition // *Mater. Des.* 2015. V. 80. P. 109–115.

13. Groover M.P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems.* – John Wiley & Sons. 2020. 1025 p.

14. Burkov A.A., Chigrin P.G. Synthesis of Ti–Al intermetallic coatings via electrospark deposition in a mixture of Ti and Al granules technique // *Surface and Coatings Technology*. 2020. V. 387. P. 125550.

15. 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.

16. Jamnapara N.I., Frangini S., Alphonsa J., Chauhan N.L., Mukherjee S., Jamnapara N.I. et al. Comparative analysis of insulating properties of plasma and thermally grown alumina films on electrospark aluminide coated 9Cr steels // *Surface and Coatings Technology*. 2015. V. 266. P. 146–150.

17. Liu J., Wang R., Qian Y. The formation of a single-pulse electrospark deposition spot // *Surface and coatings technology*. 2005. V. 200, N 7. P. 2433–2437.

18. Matlaga B.F., Yasenchak L.P., Salthouse T.N. Tissue response to implanted polymers: the significance of sample shape // *Journal of biomedical materials research*. 1976. V. 10, N 3. P. 391–397.

19. Efe G.Ç., Yenilmez E., Altinsoy I., Türk S., Bindal C.. Characterization of UHMWPE-HAp coating produced by dip coating method on Ti6Al4V alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2021. V. 418. P. 127091.

20. Shao J.Z. et al. Microstructure and wear behaviors of TiB/TiC reinforced Ti₂Ni/α (Ti) matrix coating produced by laser cladding // *Rare Metals*. 2020. V. 39. P. 304–315.

Информация об авторах

А. А. Бурков – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

References

1. Karakulak, E. (2017). Characterization of Ti–Cu powder metallurgical materials. *Int. J. Min. Met. Mater.*, 24(1), 83–90.

2. Kondo, S.-I., Nakashima, H. & Morimura, T. (2019). On the solid solubility extension by rapid quenching and spinodal decomposition during aging in melt-spun CuTi alloys. *Materials Transaction*, 60, 338–345.

3. Semboshi, S., Kaneno, Y., Takasugi, T., Han, S. Z. & Masahashi, N. (2019). Effect of composition on the strength and electrical conductivity of Cu–Ti binary alloy wires fabricated by aging and intense drawing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(3), 1389–1396.

4. Fan, Y., Fan, J. & Wang, C. (2019). Formation of typical Ti–Cu intermetallic phases via a liquid-solid reaction approach. *Intermetallics*, 113, 106577.

5. Kim, Y. K., Pouraliakbar, H. & Hong, S. I. (2020). Effect of interfacial intermetallic compounds evolution on the mechanical response and fracture of layered Ti/Cu/Ti clad materials. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138802.

6. Cao, S., Zhang, Z. M., Zhang, J. Q., Wang, R. X., Wang, X. Y., Yang, L. & Zhang, E. L. (2022). Improvement in antibacterial ability and cell cytotoxicity of Ti–Cu alloy by anodic oxidation. *Rare Metals*, 41(2), 594–609.

7. Tian, J., Xu, K., Hu, J., Zhang, S., Cao, G. & Shao, G. (2021). Durable self-polishing antifouling Cu–Ti coating by a micron-scale Cu/Ti laminated microstructure design. *Journal of Materials Science & Technology*, 79, 62–74.

8. Jin, X., Gao, L., Liu, E., Yu, F., Shu, X. & Wang, H. (2015). Microstructure, corrosion and tribological and antibacterial properties of Ti–Cu coated stainless steel. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 50, 23–32.

9. Elmi Hosseini, S. R., Feng, K., Nie, P., Zhang, K., Huang, J., Li, Z. & Xue, S. (2018). Enhanced Strength of 304 SS–Ti6Al4V Laser-Welded Joints Containing Composite Interlayers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(11), 6135–6148.

10. Burkov, A. A. & Bytsura, A. Y. (2022). Corrosion properties and tribological behavior of tungsten carbide coatings with alumide matrix on ss AISI304. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 19(4), 509–519. (In Russ.).

11. Shafyei, H., Salehi, M. & Bahrami, A. (2020). Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB₂ composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method. *Ceramics International*, 46(10), 15276–15284.
12. Burkov, A. A. & Pyachin, S. A. (2015). Formation of WC–Co coating by a novel technique of electrospark granules deposition. *Materials & Design*, 80, 109–115.
13. Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons. P. 1025.
14. Burkov, A. A. & Chigrin, P. G. (2020). Synthesis of Ti–Al intermetallic coatings via electrospark deposition in a mixture of Ti and Al granules technique. *Surface and Coatings Technology*, 387, 125550.
15. Kwok, D. Y. & Neumann, A. W. (1999). Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in colloid and interface science*, 81(3), 167–249.
16. Jamnapara, N. I., Frangini, S., Alphonsa, J., Chauhan, N. L., Mukherjee, S. & Jamnapara, N. I. et al. (2015). Comparative analysis of insulating properties of plasma and thermally grown alumina films on electrospark aluminide coated 9Cr steels. *Surface and Coatings Technology*, 266, 146–150.
17. Liu, J., Wang, R. & Qian, Y. (2005). The formation of a single-pulse electrospark deposition spot. *Surface and coatings technology*, 200(7), 2433–2437.
18. Matlaga, B. F., Yassenchak, L. P. & Salthouse, T. N. (1976). Tissue response to implanted polymers: the significance of sample shape. *Journal of biomedical materials research*, 10(3), 391–397.
19. Efe, G. Ç., Yenilmez, E., Altinsoy, I., Türk, S. & Bindal, C. (2021). Characterization of UHMWPE-HAp coating produced by dip coating method on Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 418, 127091.
20. Shao, J. Z., Li, J., Song, R., Bai, L. L., Chen, J. L., & Qu, C. C. (2020). Microstructure and wear behaviors of TiB/TiC reinforced Ti₂Ni/α (Ti) matrix coating produced by laser cladding. *Rare Metals*, 39, 304–315.

Information about the authors

A. A. Burkov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Staff Scientist, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of sciences.

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

Статья поступила в редакцию 15.06.2023; одобрена после рецензирования 04.07.2023; принята к публикации 15.07.2023.

The article was received by the editorial board on 15 June 23; approved after reviewing 04 July 23; accepted for publication 15 July 23.