

## Preparation and properties of electrospark coatings from $\text{Ti}_3\text{Al}$ granules with silicon carbide and boron carbide additives

S. A. Pyachin<sup>†,1</sup>, T. B. Ershova<sup>1</sup>, A. A. Burkov<sup>1</sup>, N. M. Vlasova<sup>1</sup>, E. A. Kirichenko<sup>1</sup>,  
M. A. Kulik<sup>1</sup>, V. O. Krutikova<sup>2</sup>

<sup>†</sup>pyachin@mail.ru

<sup>1</sup>Institute of Materials Science, Khabarovsk Scientific center, FEB RAS, 153 Tikhookenskaya St., Khabarovsk, 680042, Russia

<sup>2</sup>Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, 65 Kim Yu Chen St., Khabarovsk, 680000, Russia

The composite coatings Ti-Al, Ti-Al-Si-C and Ti-Al-B-C were formed on the  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  titanium alloy by a new method of electro-spark deposition from granules. The granules were produced by sintering powders of titanium and aluminum mixed in a ratio of 3:1, including 15 wt.% additives of silicon carbide and boron carbide. During coating, the frequency of the discharge pulses was 1 kHz, the on-pulse duration was 0.1 ms, and the deposition time was 12 min. The manufactured electro-spark coatings had a thickness of 20-40  $\mu\text{m}$ . The composition of the surface layer formed by the deposition of pure intermetallic  $\text{Ti}_3\text{Al}$  coincides with the composition of the initial material of the electrode. The Ti-Al-Si-C coatings are based on TiC,  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  and  $\text{Ti}_{1+x}\text{Al}_{1-x}$ . The electrospark coatings formed from Ti-Al-B-C granules contain intermetallic compound  $\text{Ti}_3\text{Al}$ , borides TiB and  $\text{TiB}_2$ . Among the investigated samples, the  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  coating has the highest microhardness, which is approximately 4 times higher than that of the titanium substrate from  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ . The wear intensity of the titanium alloy during dry friction decreases by more than 19 times if it is coated with  $\text{Ti}_3\text{Al}$  or  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  coatings. The coating deposited from  $\text{Ti}_3\text{Al}$  granules with 15 wt.% SiC additive has the highest wear resistance, its rate of deterioration is 38 times lower compared to  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ . The friction coefficient of the obtained composite coatings is equal to 0.38 – 0.52. The oxidation rate of the titanium alloy during the isothermal heating at a temperature of 900°C can be reduced by 1.9 times if the alloy is coated with  $\text{Ti}_3\text{Al}$ , and can be reduced by 2.3 times if the alloy is coated with  $\text{Ti}_3\text{Al}$  with the additions of SiC or  $\text{B}_4\text{C}$ .

**Keywords:** electro-spark alloying, coating, granules, phase composition, wear resistance, heat protection.

УДК: 621.762; 537.523.4

## Получение и свойства электроискровых покрытий из гранул $\text{Ti}_3\text{Al}$ с добавками карбидов кремния и бора

Пячин С. А.<sup>†,1</sup>, Ершова Т. Б.<sup>1</sup>, Бурков А. А.<sup>1</sup>, Власова Н. М.<sup>1</sup>, Кириченко Е. А.<sup>1</sup>,  
Кулик М. А.<sup>1</sup>, Крутикова В. О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, ул. Тихоокеанская, 153, Хабаровск, 680042, Россия

<sup>2</sup>Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, Хабаровск, 680000, Россия

Сформированы композиционные Ti-Al, Ti-Al-Si-C и Ti-Al-B-C покрытия на титановом сплаве  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  с использованием нового метода электроискрового осаждения из гранул. Гранулы были изготовлены путем спекания порошков титана и алюминия, смешанных в соотношении 3:1, в том числе с 15 вес.% добавками карбидов кремния и бора. При нанесении покрытий частота следования разрядных импульсов составляла 1 кГц, а длительность разрядов — 0.1 мс, продолжительность осаждения — 12 мин. Полученные электроискровые покрытия имеют толщину, равную 20 – 40 мкм. Состав поверхностного слоя, образованного при нанесении чистого интерметаллида  $\text{Ti}_3\text{Al}$ , практически совпадает с составом исходного электродного материала. Основу Ti-Al-Si-C покрытия составляют TiC,  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  и  $\text{Ti}_{1+x}\text{Al}_{1-x}$ . Электроискровые покрытия, сформированные из Ti-Al-B-C гранул, содержат интерметаллид  $\text{Ti}_3\text{Al}$ , бориды TiB и  $\text{TiB}_2$ . Среди исследуемых образцов наибольшей микротвердостью обладает  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  покрытие, которая примерно в 4 раза выше, чем у титановой подложки из  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ . Интенсивность изнашивания титанового сплава при сухом трении снижается более чем в 19 раз, если он покрыт  $\text{Ti}_3\text{Al}$  или  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$ .

покрытиями. Наибольшей износостойкостью обладает покрытие из гранул  $Ti_3Al$  с 15 масс.% добавкой  $SiC$ , скорость его износа в 38 раз ниже по сравнению с  $Ti6Al4V$ . Коэффициент трения у полученных композиционных покрытий равен 0.38–0.52. Скорость окисления титанового сплава в процессе изотермического нагрева при температуре  $900^\circ C$  можно уменьшить в 1.9 раза, если на него нанести покрытие из алюминидов титана  $Ti_3Al$ , и в 2.3 раза, если нанести покрытие из  $Ti_3Al$  с добавкой  $SiC$  или  $B_4C$ .

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, покрытие, гранулы, фазовый состав, износостойкость, жаростойкость.

## 1. Введение

Для улучшения свойств поверхностей титановых сплавов широкое распространение получили методы осаждения упрочняющих и защитных покрытий [1–3]. В качестве материалов для нанесения покрытий на титановые сплавы особого внимания заслуживают интерметаллиды — алюминиды титана, обладающие высокой температурой плавления, низкой плотностью, высоким модулем упругости, жаропрочностью, стойкостью к окислению и возгоранию [4–7]. Свойства алюминидов титана можно улучшить путем использования неметаллов (C, B, Si) в качестве добавок, которые благодаря образованию сложных соединений и фаз дисперсного упрочнения повышают их кратковременную и длительную прочность, износостойчивость и жаростойкость [7–9]. Так, известно, что твердость покрытий системы Ti–Al–Si выше, чем у Ti–Al покрытия, что связано с формированием силицида  $Ti_5Si_3$  [7]. Кроме того, наличие кремния повышает высокотемпературное сопротивление окислению покрытий. С увеличением концентрации добавок Si и C в Ti–47Al–3Nb сплав улучшается его микроструктурная однородность, а также увеличивается его предел текучести при комнатной температуре. Основным механизмом упрочнения модифицированного сплава является упрочнение вследствие образования твердого раствора [8].

Одной из перспективных технологий для нанесения защитных покрытий на титановые сплавы является электроискровое легирование (ЭИЛ) [10–15]. Ранее нами было показано, что ЭИЛ можно успешно применять для создания покрытий из алюминидов титана, используя электроды из интерметаллидов [16], либо поочередно осаждавая титан и алюминий [17]. Введение добавок  $TiC$ ,  $B_4C$ ,  $SiC$  в  $Ti_3Al$  улучшает износ- и жаростойкость электроискровых покрытий, полученных из данных материалов [18,19]. Электроискровое осаждение алюминидов  $Ti_3Al$  с добавкой карбида титана на сталь 35 позволило повысить ее устойчивость к микроабразивному износу и газовой коррозии в 1.9 и 3 раза, соответственно, по сравнению со стальной подложкой. Стойкость покрытия  $Ti_3Al$ –10%B<sub>4</sub>C к высокотемпературному окислению в воздушной среде превышает жаростойкость непокрытого титанового сплава  $Ti6Al4V$  в 6 раз, а износостойкость покрытия при трении — в 100 раз.

Новым направлением в области электроискровой обработки является осаждение покрытий с использованием крупных (размером до 10 мм) частиц из проводящих материалов, которые служат источником вещества для формирования поверхностного слоя [20]. Данная схема нанесения металлических покрытий позволяет повысить однородность осаждаемого слоя и сократить

время на электроискровое легирование поверхности обрабатываемой детали, что достигается за счет увеличения числа контактов гранул с подложкой. Целью данной работы заключалась в получении поверхностных слоев из алюминидов  $Ti_3Al$  с модифицирующими добавками на титановом сплаве  $Ti6Al4V$  новым электроискровым методом осаждения покрытий из гранул, изучении их структуры, состава, триботехнических характеристик и жаростойкости при высокотемпературном нагреве.

## 2. Материалы и методы исследования

Алюминид титана  $Ti_3Al$  был получен путем смешивания порошков титана марки ПТОМ-1 (Ti — 99%, H — 0.37%, N — 0.08%, Si — 0.09%, Ca — 0.065%) диаметром менее 45 мкм и алюминия марки ПА-1 (Al — 99%, Fe — 0.3%, Si — 0.4%, Cu — 0.02%) со средним диаметром 300 мкм, взятых в мольных долях 3:1, в шаровой мельнице РМ 400 в течение 4 часов и последующего спекания при температуре  $1400^\circ C$  в течение 3 часов в вакууме с остаточным давлением 1.3 Па. Кроме того, к смеси порошков Ti и Al были отдельно в количестве 15 масс.% добавлены порошки  $SiC$  марки х.ч. со средним диаметром 600 мкм и порошки  $B_4C$  марки х.ч. со средним диаметром 100 мкм. Данные порошковые смеси спекали при тех же самых условиях, что и  $Ti_3Al$ . Спеченные интерметаллидные сплавы имели форму брусков с размерами  $25 \times 8 \times 8$  мм. Брусочки разрезали на гранулы кубической формы с размерами сторон 4–5 мм. Экспериментально установлено, что такие размеры гранул являются оптимальными для нанесения покрытий.

В качестве подложек использованы образцы из сплава  $Ti6Al4V$ , изготовленные в форме цилиндров диаметром 12 мм и высотой 10 мм. Покрытия осаждали с помощью установки, которая состоит из генератора разрядных импульсов и стального контейнера, соединенного ремненной передачей с электромотором [21]. Контейнер представляет собой цилиндрический стакан с внутренним диаметром 45 мм и высотой 45 мм. Образец-подложку закрепляли в центре внутренней полости контейнера, а оставшееся пространство заполняли гранулами. Положительный потенциал от генератора импульсов подавали на контейнер, а отрицательный — на подложку. Во время прохождения разрядов контейнер вращался со скоростью 60 об/мин, катод-подложка — с аналогичной скоростью в обратном направлении. Частота следования разрядных импульсов составляла 1 кГц, а длительность разрядов — 0.1 мс. Амплитуда импульсов тока была  $110 \pm 10$  А; межэлектродное напряжение —  $30 \pm 5$  В. Продолжительность осаждения каждого покрытия — 12 мин. Для предотвращения окисления металлов при электроразрядной обработке

внутри контейнера подавали аргон. Используемые в статье обозначения полученных покрытий соответствуют исходным составам смесей порошков, из которых были получены гранулы.

Количество вещества, перенесенного с гранул на катод, контролировали взвешиванием образцов через каждые 2 минуты электроискровой обработки на весах Vibra HT с точностью  $10^{-4}$  г. Фазовый состав полученных покрытий изучали с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в  $\text{Cu-K}_\alpha$  излучении. Для идентификации линий рентгенограмм применен программный пакет PDWin (НПП «Буревестник») и база рентгенодифракционных данных PDF-2. Микротвердость  $H_\mu$  образцов измеряли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0.5 Н.

Износостойкость покрытий изучена в соответствии со стандартом ASTM G99 в режиме изнашивания неподвижного пальца, к которому приложена нагрузка, при скольжении вдоль поверхности вращающегося диска без абразива и смазки. Для испытаний применяли триботехнический стенд собственного изготовления. Нагрузку задавали с помощью калибровочных грузов. Испытуемый образец — цилиндр из титанового сплава с покрытием закрепляли на торец пальца. Диск диаметром 100 мм из быстрорежущей стали P6M5 использован в качестве контртела. Скорость вращения диска — 12 об/с (1.9 м/с). Нагрузка на испытуемый образец — 25 Н. Убыль массы образца за счет изнашивания определяли путем его взвешивания до и после испытания с помощью лабораторных весов с точностью 0.1 мг. Износостойкость оценивали по интенсивности объемного изнашивания, деленной на величину нагрузки

$$W = \Delta m / (\rho N l),$$

где  $\Delta m$  — потеря массы образца при истирании;  $\rho$  — плотность покрытия, приблизительно равная плотности материала гранул, из которых осаждали покрытия ( $\text{Ti}_3\text{Al}$  — 3.9 г/см<sup>3</sup>,  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  — 3.4 г/см<sup>3</sup>,  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  — 3.5 г/см<sup>3</sup>);  $N$  — нагрузка на палец;  $l$  — длина пути трения. Во время триботехнических тестов крутящий момент измерялся цифровым датчиком M40–50, сигнал которого передавался в компьютер для мониторинга процесса измерений и сохранения данных. Это позволило определить величину коэффициента трения скольжения и проследить за его изменением.

Стойкость полученных образцов к высокотемпературной газовой коррозии исследована на термическом анализаторе Netzsch STA 449 F3 посредством нагрева и изотермической выдержки образцов при 900°C на воздухе.

### 3. Результаты и обсуждение

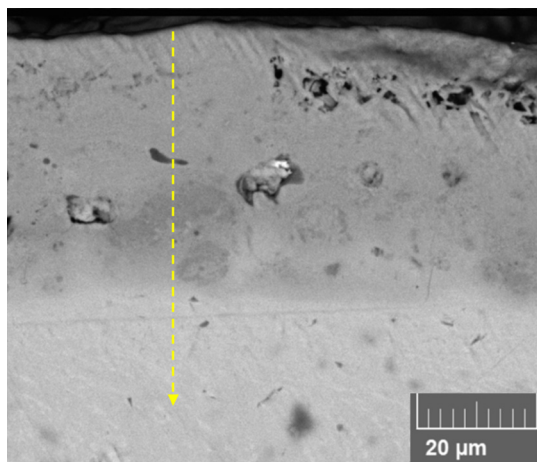
При воздействии разрядов гранулы разрушаются, и их общая масса уменьшается. Наиболее сильно подвержены электрической эрозии частицы из интерметаллида  $\text{Ti}_3\text{Al}$  без добавок. Их потеря массы  $\Delta m_a = 1.6$  мг за 12 мин. Гранулы из сплавов  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  и  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  более стойкие к такому виду воздействия, потери их массы меньше в 1.6 и 2.7 раз соответственно. В процессе электроискровой обработки

часть эродированного материала осаждается на титановой подложке, и в результате наблюдается прирост массы подложки-анода  $\Delta m_k(\text{Ti}_3\text{Al}) = 0.033$  мг,  $\Delta m_k(\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}) = 0.018$  мг,  $\Delta m_k(\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}) = 0.033$  мг. Однако, коэффициент массопереноса материала гранул на катод, вычисляемый как  $K_m = \Delta m_k / \Delta m_a$ , имеет невысокие значения около 2–3%. Это указывает на то, что большая часть эродированного вещества не закрепляется на поверхности титанового сплава, а опускается на дно контейнера в виде мелких частиц. Размеры этих частиц лежат в диапазоне от 20 нм до десятков микрон. Их можно в дальнейшем спрессовать и спечь в новые гранулы, т. е. использовать повторно для осаждения покрытий.

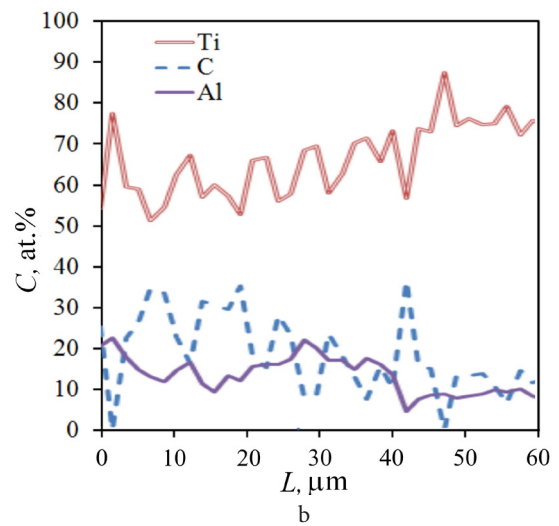
Толщина полученных электроискровых покрытий равна 20–40 мкм, что близко к толщине поверхностных слоев, получаемых по традиционной одноэлектродной схеме ЭИЛ. СЭМ-изображения в режиме отраженных электронов сечений покрытий  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  и  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  показаны на Рис. 1а и 2а. Видно, что микроструктура покрытий отличается от микроструктуры титанового сплава. Она неоднородна, в ней можно различить более темные области с повышенным содержанием элементов с малым атомным весом. Для профилей распределения элементов в покрытиях характерны резкие перепады до 20 ат.%. Примечательно, что изменения концентрации Ti и C происходят «противофазно», а распределение Al в поверхностных слоях более равномерно. В покрытиях присутствуют микродефекты в виде пор и трещин, возникающих в результате внутренних напряжений при переменной тепловой нагрузке.

Рентгеновские дифрактограммы электродных материалов и соответствующих им покрытий показаны на Рис. 3. Согласно результатам дифракционного анализа, при осаждении чистого интерметаллида  $\text{Ti}_3\text{Al}$  состав формируемого поверхностного слоя практически совпадает с составом исходного электродного материала, с той лишь разницей, что дополнительно образуется нитрид титана TiN (Рис. 3а). Гранулы, полученные спеканием порошков Ti, Al и SiC, содержат тройные соединения  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  и  $\text{Ti}_3\text{Si}_3\text{C}_x$  (Рис. 3б). При переносе вещества с поверхности этих гранул на титановый сплав формируется покрытие другого состава. Основу его составляет карбид титана TiC, силицид  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ , и алюминид титана переменной стехиометрии  $\text{Ti}_{1+x}\text{Al}_{1-x}$ . Наблюдаемые факты можно объяснить тем, что во время нанесения электроискровых покрытий карбосилицид титана  $\text{Ti}_5\text{Si}_3\text{C}_x$  и карбоалюминид титана  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  разлагаются вследствие высоких температур в области воздействия разрядов. Изменение состава происходит также при спекании частиц Ti, Al и  $\text{B}_4\text{C}$  и последующем электроразрядном осаждении на титановый сплав Ti6Al4V. Если интерметаллидный Ti-Al-B-C сплав после спекания состоит в основном из сложного карбида  $\text{Ti}_2\text{AlC}$  и диборида титана  $\text{TiB}_2$  с небольшим количеством TiC и  $\text{Ti}_3\text{Al}$  (Рис. 3с), то уже электроискровые покрытия содержат фазы — интерметаллид  $\text{Ti}_3\text{Al}$ , бориды TiB и  $\text{TiB}_2$ .

Микротвердость покрытий из интерметаллида  $\text{Ti}_3\text{Al}$  без добавок и  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  в 2.5 раза больше,



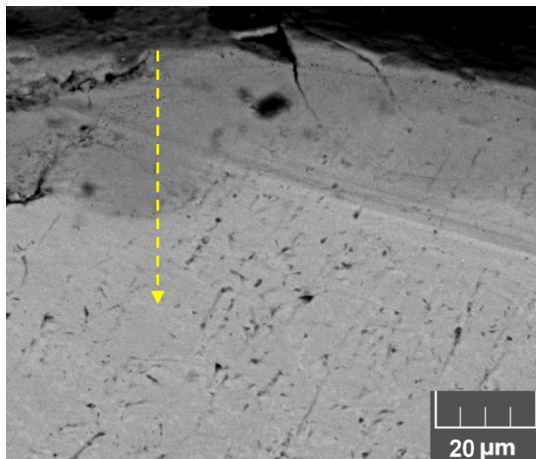
a



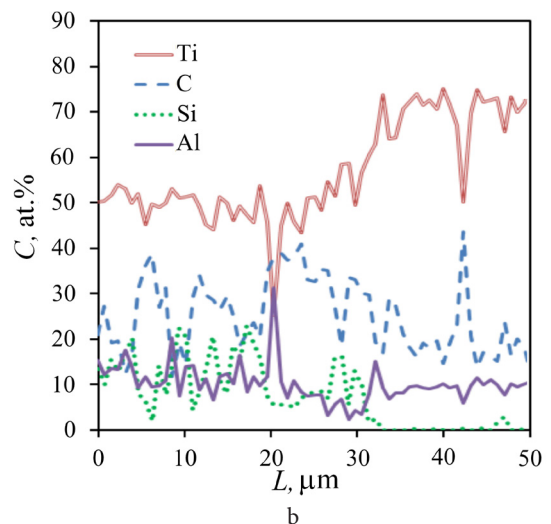
b

**Рис. 1.** (Color online) СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  на сплаве  $\text{Ti6Al4V}$  (a), распределение элементов вдоль пунктирной линии, изображенной на фото слева (b).

**Fig. 1.** (Color online) SEM-image of  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  coating cross section on  $\text{Ti6Al4V}$  alloy (a), distributions of elements along the dotted line depicted in photo at left (b).



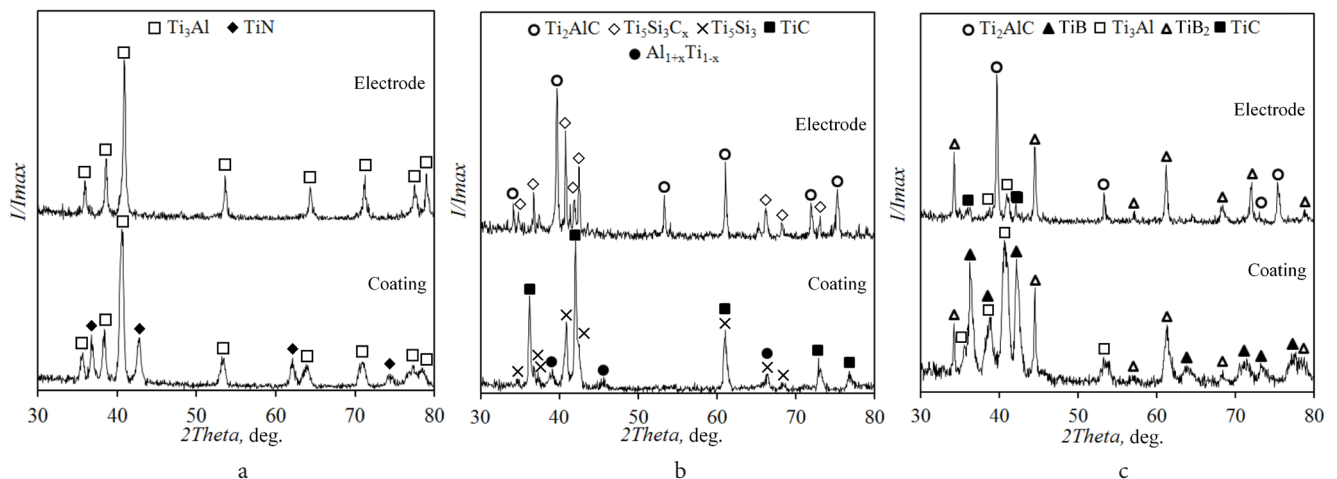
a



b

**Рис. 2.** (Color online) СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  на сплаве  $\text{Ti6Al4V}$  (a), распределение элементов вдоль обозначенной пунктиром линии, изображенной на фото слева (b).

**Fig. 2.** (Color online) SEM-image of  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  coating cross section on  $\text{Ti6Al4V}$  alloy (a), distributions of elements along the dotted line depicted in photo at left (b).



a

b

c

**Рис. 3.** Рентгеновские дифрактограммы гранул и соответствующих электроискровых покрытий:  $\text{Ti}_3\text{Al}$  (a);  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  (b);  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  (c).

**Fig. 3.** XRD patterns of granules and the corresponding electrospark coatings:  $\text{Ti}_3\text{Al}$  (a);  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{SiC}$  (b);  $\text{Ti}_3\text{Al}+15\%\text{B}_4\text{C}$  (c).



чем у титанового сплава Ti6Al4V, из которого изготовлены подложки (Табл. 1).  $Ti_3Al+15\%SiC$ -покрытие обладает наибольшей микротвердостью  $14.5 \pm 2.0$  ГПа, которая примерно в 4 раза выше, чем у титанового сплава Ti6Al4V.

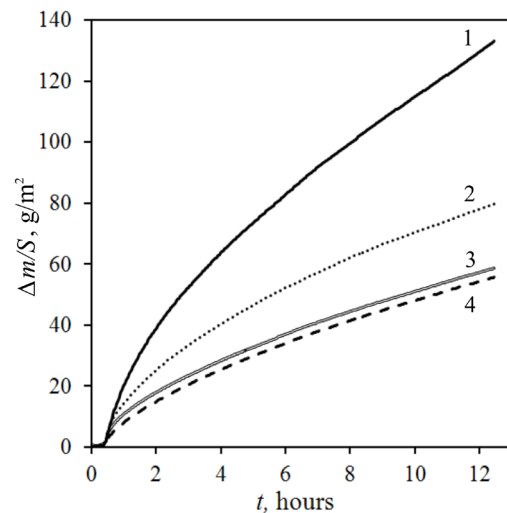
В ходе триботехнических тестов установлено, что потери массы титанового сплава за счет изнашивания при сухом трении снижаются более чем в 19 раз благодаря интерметаллидным покрытиям (Табл. 1). Покрытие из алюминидов  $Ti_3Al$  с 15 масс.% добавкой карбида кремния по износостойкости обладает преимуществом в сравнении с интерметаллидным  $Ti_3Al$  покрытием без добавки, поскольку интенсивность его изнашивания в два раза ниже. Оно же обладает наименьшим коэффициентом трения 0.38–0.48 среди исследованных образцов.

Испытания на жаростойкость показали, что скорость окисления сплава Ti6Al4V при изотермическом отжиге при температуре  $900^\circ C$  уменьшается в 1.9 раза, если на него нанести покрытие из алюминидов титана  $Ti_3Al$ , а если из  $Ti_3Al$  с добавкой SiC или  $B_4C$ , то — в 2.3 раза (Рис. 4). Таким образом, добавки повышают барьерные свойства электроискровых интерметаллидных покрытий.

Сравнивая характеристики поверхностных слоев, осажденных согласно традиционной одноэлектродной схеме электроискрового легирования [19,22] и новой схеме нанесения из гранул, можно сделать заключение, что положительного эффекта от применения нового метода удалось достичь для микротвердости  $Ti_3Al+15\%B_4C$  покрытия, наблюдается рост  $H_u$  примерно на 20%, и для жаростойкости  $Ti_3Al+15\%SiC$  покрытия, скорость окисления которого ниже на 40% при высокотемпературной выдержке на воздухе.

#### 4. Заключение

На титановом сплаве Ti6Al4V сформированы защитные покрытия новым методом электроискрового осаждения из гранул алюминидов титана  $Ti_3Al$  с модифицирующими добавками карбидов  $B_4C$  и SiC. Установлено, что по сравнению с титановой подложкой полученные покрытия имеют более высокую микротвердость (в 2.5–3.8 раза), жаростойкость (в 1.9–2.3 раза) и износостойкость (в 19–38 раз), меньший коэффициент



**Рис. 4.** Изменение удельной массы в процессе окисления титанового сплава без (1) и с покрытиями:  $Ti_3Al$  (2);  $Ti_3Al+15\%B_4C$  (3),  $Ti_3Al+15\%SiC$  (4) на воздухе при  $900^\circ C$ .

**Fig. 5.** Specific mass change of uncoated titanium alloy (1) and coated one with  $Ti_3Al$  (2),  $Ti_3Al+15\%B_4C$  (3),  $Ti_3Al+15\%SiC$  (4) during oxidation in air at  $900^\circ C$ .

трения (в 1.1–1.3 раза). Среди исследуемых образцов наиболее оптимальными характеристиками обладает покрытие из  $Ti_3Al+15\%SiC$ , что можно объяснить присутствием в осажденном слое карбида титана  $TiC$  и силицида титана  $Ti_5Si_3$ .

Перспективность новой технологии ЭИЛ из гранул заключается в простоте создания оборудования для осаждения модифицированных слоев и возможности наносить покрытия на детали сложной формы. Благодаря использованию нового метода удалось повысить микротвердость электроискрового  $Ti_3Al+15\%B_4C$  покрытия на 20% и жаростойкость электроискрового  $Ti_3Al+15\%SiC$  покрытия на 40% по сравнению с аналогичными покрытиями, полученными по традиционной технологии ЭИЛ с одним легирующим электродом-анодом.

*Благодарности/Acknowledgements. Работа поддержана Правительством Хабаровского края (грант № 1181/2018Д от 28.06.2018 г.)./The work was supported by the Khabarovsk Krai government (grant № 1181/2018D from 28.06.2018).*

**Табл. 1.** Микротвердость и триботехнические характеристики Ti6Al4V сплава и покрытий.

**Table 1.** Microhardness and tribo-thechnical properties of Ti6Al4V alloy and coatings.

Характеристика / Characteristic	Подложка / Substrate	Покрытие / Coating		
	Ti6Al4V	$Ti_3Al$	$Ti_3Al+15\%SiC$	$Ti_3Al+15\%B_4C$
Микротвердость, ГПа / Microhardness, GPa	$3.8 \pm 0.5$	$9.5 \pm 1.8$	$14.5 \pm 2.0$	$9.9 \pm 1.9$
Интенсивность изнашивания, $10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ / Wear intensity, $10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$	172.2	8.9	4.5	7.6
Коэффициент трения / Friction coefficient ( $l=600 \text{ м}$ )	Начало пути скольжения / Beginning of sliding distance			
	0.5–0.6	0.55–0.867	0.38–0.452	0.40–0.502
	Середина пути скольжения / Middle of sliding distance			
	0.5–0.6	0.7–0.78	0.42–0.46	0.50–0.56
	Конец пути скольжения / End of sliding distance			
	0.5–0.6	0.78–0.82	0.46–0.48	0.56–0.54

## Литература/References

1. F. Movassagh-Alanagh, A. Abdollah-zadeh, M. Aliofkhazraei, M. Abedi. *Wear*. 390 – 391, 93 (2017). [Crossref](#)
2. M. Chen, W. Li, M. Shen, S. Zhu, F. Wang. *Corrosion Science*. 74, 178 (2013). [Crossref](#)
3. I. Gurrappa, A.K. Gogia. *Surface and Coatings Technology*. 139 (2), 216 (2001). [Crossref](#)
4. C. Leyens, M. Peters, W.A. Kaysser. *Surface and Coatings Technology*. 94 – 95, 34 (1997). [Crossref](#)
5. B. Guo, J. Zhou, S. Zhang, H. Zhou, Y. Pu, J. Chen. *Applied Surface Science*. 253 (24), 9301 (2007). [Crossref](#)
6. M. Zhang, M. Shen, L. Xin, X. Ding, S. Zhu, F. Wang. *Corrosion Science*. 112, 36 (2016). [Crossref](#)
7. J. Dai, F. Zhang, A. Wang, H. Yu, C. Chen. *Surface and Coatings Technology*. 309, 805 (2017). [Crossref](#)
8. S.W. Kim, P. Wang, M.H. Oh, D.M. Wee, K.S. Kumar. *Intermetallics*. 12 (5), 499 (2004). [Crossref](#)
9. F. Oukati Sadeq, M. Sharifitabar, M. Shafiee Afarani. *Surface and Coatings Technology*. 337, 349 (2018). [Crossref](#)
10. B.R. Lazarenko, V.V. Mikhailov, A.E. Gitlevich, A.D. Verkhoturov, I.S. Anfimov. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. 3, 28 (1977).
11. V.V. Mikhailov, A.E. Gitlevich, A.D. Verkhoturov, A.I. Mikhailyuk, A.V. Belyakov, L. A. Konevtsov. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 49 (5), 373 (2013). [Crossref](#)
12. E.A. Levashov, E.I. Zamulaeva, A.E. Kudryashov, P.V. Vakaev, M.I. Petrzhik. *Plasma Processes and Polymers*. 4 (3), 293 (2007). [Crossref](#)
13. V.I. Ivanov, F.K. Burumkulov. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 46 (5), 416 (2010). [Crossref](#)
14. Z. Li, W. Gao, Y. He. *Scripta Materialia*. 45 (9), 1099 (2001). [Crossref](#)
15. Y. Iino, K. Yaesawa. *International Journal of Modern Physics B*. 17 (8–9), 1158 (2003). [Crossref](#)
16. S.A. Pyachin, T.B. Ershova, A.A. Burkov, N.M. Vlasova, V.C. Komarova. *Russ. J. Non-Ferrous Metals*. 57 (3), 266 (2016). [Crossref](#)
17. S.A. Pyachin, A.A. Burkov, V.S. Komarova. *Journal of Surface Investigation*. 7 (3), 515 (2013). [Crossref](#)
18. A.A. Burkov, S.A. Pyachin, T.B. Ershova, N.M. Vlasova, E.A. Kirichenko. *Fundamental Problems of Modern Materials Science*. 14 (2), 159 (2017). (in Russian) [A.A. Бурков, С.А. Пячин, Т.Б. Ершова, Н.М. Власова, Е.А. Кириченко. *Фундаментальные Проблемы Современного Материаловедения*, 14 (2), 159 (2017).]
19. A.A. Burkov, S.A. Pyachin, N.M. Vlasova. *Blank production in mechanical engineering*. 15 (10), 473 (2017). (in Russian) [A.A. Бурков, С.А. Пячин, Н.М. Власова. *Заготовительные производства в машиностроении*. 15 (10), 473 (2017).]
20. A.A. Burkov, S.A. Pyachin. *Materials & Design*. 80, 109 (2015). [Crossref](#)
21. Patent RF № 2650665, 18.05.2017. (in Russian) [Патент РФ № 2650665, 18.05.2017.]
22. A.A. Burkov, S.A. Pyachin, N.M. Vlasova, I.A. Astapov, M.A. Kulik. *Obrabotka Metallov*. 20 (3), 85 (2018). (in Russian) [A.A. Бурков, С.А. Пячин, Н.М. Власова, И.А. Астапов, М.А. Кулик. *Обработка металлов*. 20 (3), 85 (2018).] [Crossref](#)