

УДК 621.785.539

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-589-604

Для цитирования: Лекарев А. В., Юрчук Л. И., Меркулова Г. А. Исследование влияния альфирования на структуру и свойства сплава ВТ6 // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 589–604. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-589-604.

For citation: Lekarev A. V., Yurchuk L. I., Merkulova G. A. [Study of the influence of alphonon on the structure and properties of the alloy VT6]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 589–604. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-589-604.

Исследование влияния альфирования на структуру и свойства сплава ВТ6

А. В. Лекарев¹, Л. И. Юрчук², Г. А. Меркулова^{3*}

¹АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

²Институт химии и химической технологии СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/24

³Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения
Российская Федерация, 660025, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 95

*E-mail: gam1602@mail.ru

В работе рассмотрено влияние двух технологий альфирования (окисления) на структуру и свойства деформируемого титанового сплава ВТ6, который применяют, в частности, в авиационной и космической промышленности. Нанесение оксидного покрытия методами химико-термической обработки (ХТО) позволяет компенсировать основной недостаток сплава – низкую износостойкость поверхности. Повышается исходный комплекс свойств.

Объектами исследования являются титановый сплав ВТ6 и его оксидные покрытия. Сравнивали два образца детали с оксидными покрытиями, полученными по разным технологиям. Первая технология – альфирование в мелкозернистом графите, вторая – альфирование в вакууме.

Цель работы – выяснить влияние двух технологий альфирования на структуру и свойства сплава ВТ6.

Альфирование проведено: 1) в мелкозернистом графите при температуре 800 ± 10 °С с выдержкой в течение 8 ч; 2) в электропечи при температуре 760–780 °С в вакууме $10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт. ст. в течение 1,5–2 ч.

Выполнено исследование микроструктуры (световая и электронная микроскопия).

Использовали микроскоп типа Carl Zeiss Axio Observer A1m с применением цифровой камеры, переходных устройств преобразования оптического сигнала, компьютер.

Проведена статистическая обработка по программе SIAMS700.

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) EVO 50 с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350.

Рентгенофазовый анализ проведен с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD7000, Япония (излучение CuK α , монохроматор), в следующем режиме: диапазон от 5 до 70° по шкале 2 θ , шагом 0,03°, скорость сканирования 1,5 °/мин. Исследовали порошки, полученные с двух видов покрытий.

Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере DM8 по ГОСТ 9450–76. Износостойкость сплава оценивали на специальной лабораторной установке.

Выяснен фазовый состав и структура сплава ВТ6 после альфирования.

В диффузионном слое обнаружены: после альфирования в графите – фазы TiO $_2$; Ti $_3$ O; TiN. После альфирования в вакууме – TiO $_2$; Ti $_6$ O $_{11}$. В альфированном слое после обработки в графите выявлены зерна α – твердого раствора, интерметаллиды Ti-Al-V, Ti-V и Ti-Al; в альфированном слое после обработки в вакууме содержится больше титана, также выявлены участки со 100 % (ат.)

титана; видна область твердого раствора (α) и интерметаллиды Ti-Al-V, Ti-V и Ti-Al. Толщина оксидированного слоя составляет в среднем 103,6 мкм (графит), а в вакууме – 66,8 мкм. Средний размер зерна в слое составляет 17,2 мкм (графит); 6,0 мкм (вакуум). Установлено, что химико-термическая обработка (альфирование) способствует существенному повышению микротвердости в диффузионном слое. На поверхности получена твердость HV580 (вакуум) и HV724 (графит). Альфирование в графите и вакууме обеспечивает износостойкость изделия, однако лучший результат получен после альфирования в вакууме. Обе технологии улучшают свойства, но выгоднее проводить альфирование в вакууме, так как в этом случае процесс проводят в течение 2-х ч вместо 8 ч в графите. Альфирование (оксидирование) обеспечивает износостойкость сплава ВТ6, что способствует надежной работе изделия при эксплуатации.

Ключевые слова: альфирование, титановый сплав ВТ6, микроструктура, микротвердость, износостойкость, рентгенофазовый анализ.

Study of the influence of alphonon on the structure and properties of the alloy BT6

A. V. Lekarev¹, L. I. Yurchuk², G. A. Merkulova^{3*}

¹JSC “Krasnoyarsk Machine-Building Plant”

29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

²Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS

50/24, Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science

95, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation

*E-mail: gam1602@mail.ru

The paper considers the influence of two technologies of alfining (oxidation) on the structure and properties of the deformable titanium alloy BT6, which is used, in particular, in the aviation and space industries. The application of oxide coating by methods of chemical-thermal treatment (CTO) allows to compensate for the main drawback of the alloy – low wear resistance of the surface. The initial set of properties increases. The objects of research are titanium alloy BT6 and its oxide coatings. Two samples of the part with oxide coatings obtained by different technologies were compared. The first technology is alfining in fine-grained graphite, the second is alfining in a vacuum.

The aim of the work is to find out the influence of two technologies of alfining on the structure and properties of the BT6 alloy. Alfining was carried out: 1) in fine-grained graphite at a temperature of $800 \pm 10^\circ \text{C}$ with exposure for 8 hours; 2) in an electric furnace at a temperature of $760\text{--}780^\circ \text{C}$ in a vacuum of $10^{-1} - 10^{-3} \text{ mm Hg. art.}$ for 1.5–2 hours. A study of the microstructure (light and electron microscopy) was performed. We used a microscope type Carl Zeiss Axio Observer A1m using a digital camera, adapter devices for converting an optical signal, a computer. Statistical processing was carried out according to the SIAMS700 program. Electron microscopic studies were performed using a scanning electron microscope (SEM) EVO 50 with an energy-dispersive microanalyzer INCA Energ 350.

X-ray phase analysis was carried out using an X-ray diffractometer Shimadzu XRD7000, Japan (CuK α radiation, monochromator), in the following mode: range from 5 to 70° on a scale of 2θ , increments of 0.03° , scanning speed of $1.5^\circ / \text{min}$. Powders obtained from two types of coatings were investigated.

The microhardness of the samples was measured on the DM8 microhardometer according to GOST 9450–76. The wear resistance of the alloy was assessed at a special laboratory installation. The phase composition and structure of the BT6 alloy after alphonon were clarified. In the diffusion layer, the following were detected: after alphonon in graphite – TiO₂ phases; Ti₃O; TiN. After carbonation in vacuum – TiO₂; Ti₆O₁₁. In the alphas layer, after processing in graphite, grains of α – solid solution, intermetallics Ti–Al–V, Ti–V and Ti–Al were detected; the alphas layer contains more titanium after treatment in vacuum, and areas with 100% (at.) titanium have also been identified; the region of solid

solution (α) and the intermetallics Ti–Al–V, Ti–V and Ti–Al are visible. The thickness of the oxidized layer is on average 103.6 μm (graphite), and in a vacuum - 66.8 μm . The average grain size in the layer is 17.2 μm (graphite); 6.0 μm (vacuum). It has been established that chemical-thermal treatment (alfing) contributes to a significant increase in microhardness in the diffusion layer. The hardness of HV580 (vacuum) and HV724 (graphite) was obtained on the surface. Alfing in graphite and in vacuum ensures the wear resistance of the product, but the best result is obtained after alfing in a vacuum. Both technologies improve the properties, but it is more profitable to carry out alfing in a vacuum, since in this case the process is carried out within 2 hours instead of 8 hours in graphite. Alfing (oxidation) provides wear resistance of the BT6 alloy, which contributes to the reliable operation of the product during operation.

Keywords: alphonng, titanium alloy BT6, microstructure, microhardness, wear resistance, X-ray phase analysis.

Введение

Известны достоинства титана: малая плотность (4,5 г/см³), высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, технологичность при обработке давлением и свариваемость, хладостойкость, высокая стойкость против солнечной радиации, немагнитность и другие ценные физико-механические характеристики.

Сплавы титана используют в ракетно-космической технике, судостроении, транспортном машиностроении. Создание высокопрочных титановых сплавов привело к появлению сверхзвуковых самолетов. Считают, что титановые сплавы перспективны для использования в пищевой промышленности. Их применяют в холодильной и криогенной технике, медицине, строительстве (Япония).

Структура и свойства титановых сплавов приведены в работах [1–9]. Сплавы имеют низкую износостойкость. Для повышения антифрикционных свойств детали из титановых сплавов подвергают альфированию (оксидированию), т. е. поверхность титановых сплавов насыщают кислородом при повышенных температурах. Окисление приводит к образованию на поверхности окисной пленки и слоя твердого раствора кислорода в титане (альфированный слой). Технологии альфирования даны в [10–16]. Происходит химико-термическая обработка. Альфирование выполняют, в частности, в мелкозернистом графите [12], вакууме [13].

Цель данной работы – выяснить влияние двух технологий альфирования на структуру и свойства сплава BT6.

Материалы и методика исследования

Для исследования выбран титановый деформируемый сплав BT6. Его легируют алюминием (от 5,3 до 6,8 % масс.) и ванадием (от 3,5 до 5,3 % масс.) [17]. Структура и свойства сплава BT6 описаны в источниках [1–9].

Химико-термическую обработку провели для гильзы из сплава BT6. Альфирование (оксидирование) проводили по двум технологиям:

- 1) в мелкозернистом графите при температуре 800±10 °С с выдержкой в течение 8 ч [12];
- 2) электропечи при температуре 760–780 °С в вакууме 10^{–1}–10^{–3} мм рт. ст. в течение 1,5–2 ч [13].

Металлографические исследования образцов, нарезанных из гильзы, проведены на установке оптико-компьютерной металлографии, которая включает микроскоп типа Carl Zeiss Axio Observer A1m с применением цифровой камеры, переходных устройств преобразования оптического сигнала, компьютер. Исследования структуры выполнили при увеличениях ×200, ×500, ×1000.

Для количественного анализа полученных изображений использовали программное обеспечение SIAMS700.

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) EVO 50 с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350.

Рентгенофазовый анализ проведен с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD7000, Япония (излучение $\text{CuK}\alpha$, монохроматор), в следующем режиме: диапазон от 5 до 70° по шкале 2 θ , шагом 0,03°, скорость сканирования 1,5 °/мин. Исследовали порошки, полученные с двух видов покрытий.

Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере DM8 по ГОСТ 9450–76 [18]. Измерение проведено при нагрузке 100 гс (980,665 мН) от края образца к центру. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков – 70 мкм, расстояние между двумя соседними рядами отпечатков – 70 мкм. Между рядами отпечатков также присутствует смещение от края к центру образца на 10 мкм. Оценивали микротвердость альфированных покрытий, полученных по двум технологиям. На каждом образце делали 60 измерений. Вычислены средние арифметические полученных значений микротвердости.

Испытание на стойкость образцов к износу проводили на специальном приспособлении. Через щель продевали ленты из шлифовальной бумаги зернистости P120 (величина абразивного зерна 100–125 мкм), на которую укладывали образец. Далее образец прижимали грузом весом 1 кгс и протягивали ленту. Отрезок ленты, истирающий поверхность, имеет длину 1 м, ширину 1 см. После протягивания образец очищали от абразивной пыли и взвешивали на весах ВЛТЭ-150 с точностью до 0,001 г, после чего повторяли испытание. В итоге путь износа каждого образца составил 10 м.

Результаты исследований и их обсуждение

Металлографический анализ. Сплав ВТ6 относят к системе титан – алюминий (6 %) – ванадий (4 %). Это деформируемый двухфазный $\alpha + \beta$ сплав, где α – твердый раствор алюминия (и ванадия) в α -Ti с ГПУ решеткой; β – твердый раствор алюминия (и ванадия) в β -Ti с ОЦК решеткой. Титан – полиморфный металл. Легирование сплава ВТ6 алюминием упрочняет и стабилизирует α -фазу, повышает температуру A_{c3} , снижает удельный вес сплава. Ванадий является β -стабилизатором. Он снижает температуру $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ -перехода, которая для сплава ВТ6 равна 960–1000 °С [1; 4]. В работе [9] приведена диаграмма состояния системы титан-алюминий. В богатой титаном области образуются два интерметаллида Ti_3Al (α_2 -фаза) и TiAl (γ -фаза). Фаза α_2 (Ti_3Al) имеет ГПУ кристаллическую структуру, близкую к решетке α -фазы, но отличается от нее упорядоченным расположением атомов титана и алюминия. Фаза γ (TiAl) обладает упорядоченной тетрагонально искаженной гранецентрированной структурой, аналогичной сверхструктуре CuAu , в которой слои, упакованные атомами титана, чередуются со слоями, занятыми атомами алюминия.

В богатой титаном области происходят два перитектических превращения: $(\text{ж} + \beta) \rightarrow \alpha$ (при 1475 °С) и $(\text{ж} + \alpha) \rightarrow \gamma$ (при 1447 °С). При более низкой температуре (1118 °С) наблюдается эвтектоидный распад α -фазы по схеме $\alpha \rightarrow \alpha_2 + \gamma$. Растворимость алюминия в α -Ti уменьшается с понижением температуры и составляет 10, 9 и 7 % (по массе) при температурах 900, 800 и 600 °С соответственно.

Кислород является α -стабилизатором, т. е. расширяет область α -фазы. Диаграмма состояния системы титан-кислород приведена на рис. 1.

Кислород значительно растворяется в α -Ti и резко повышает температуру полиморфного превращения титана [19]. При 1720 °С протекает перитектическая реакция $\text{Ж} + (\alpha\text{-Ti}) \rightarrow (\beta\text{-Ti})$. Максимальная растворимость кислорода в $(\beta\text{-Ti})$ составляет 8 % (ат.) при 1720±25 °С. Температура плавления (α -Ti) достигает максимума, равного 1885±25 °С при содержании примерно 24 % (ат.) кислорода. При дальнейшем увеличении содержания кислорода температура плавления сплавов несколько снижается. При температурах ниже 600 °С существуют два оксида Ti_3O и Ti_2O с гексагональной кристаллической решеткой. При этих температурах в сплавах с более высоким содержанием титана возможно образование субоксида Ti_6O .

В системе титан – кислород возможно наличие следующих промежуточных фаз: Ti_3O , Ti_2O , Ti_3O_2 , γTiO , αTiO , $\alpha\text{Ti}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{Ti}_3\text{O}_5$, $\beta\text{Ti}_3\text{O}_5$, TiO_2 (TiO_2 – рутил; TiO_2 – анатаз; TiO_2 – брукит) [19].

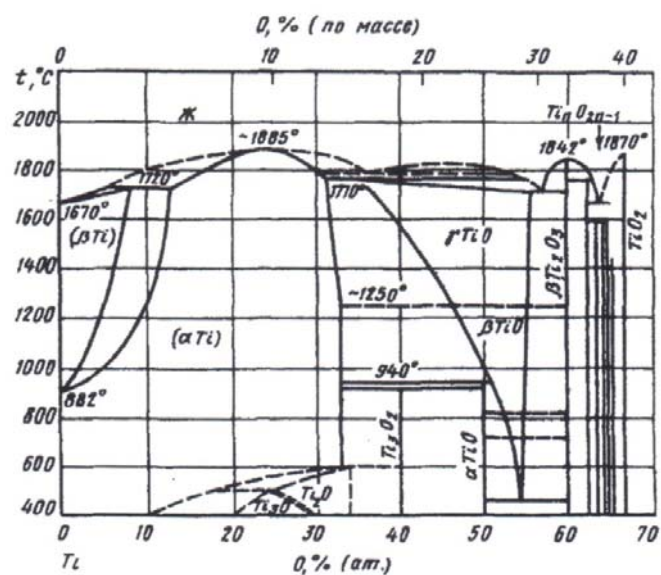


Рис. 1. Диаграмма состояния системы титан-кислород [19; 20]

Fig. 1. Diagram of the state of the titanium-oxygen system [19; 20]

Исследованные микроструктуры и результаты их обработки приведены на рис. 2–12.

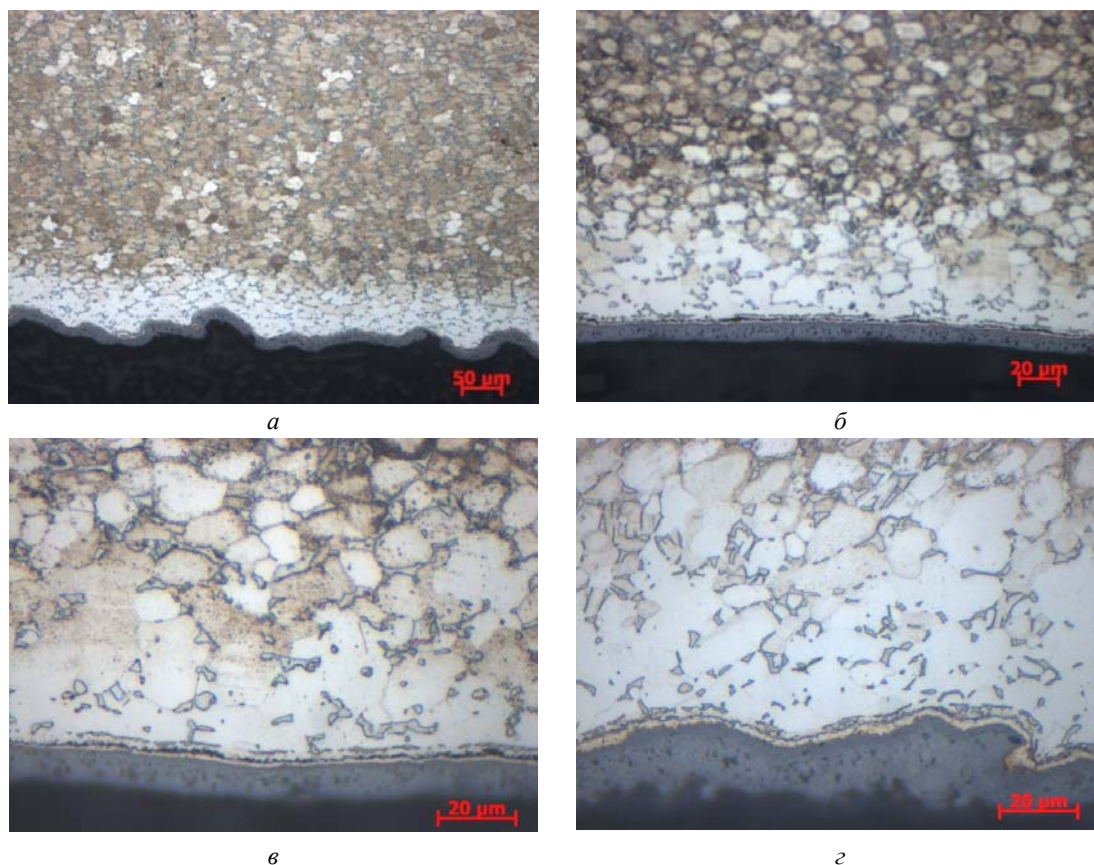


Рис. 2. Микроструктуры сплава BT6 после альфирования в графите:
а–г – поверхностный слой; д, е – центр образца; а – $\times 200$; б – $\times 500$; в, г – $\times 1000$; д – $\times 500$; е – $\times 1000$ (Начало)

Fig. 2. Microstructures of BT6 alloy after alfa-firing in graphite:
а–г – is the surface layer; д, е – is the center of the sample; а – $\times 200$; б – $\times 500$;
в, г – $\times 1000$; д – $\times 500$; е – $\times 1000$ (Начало)

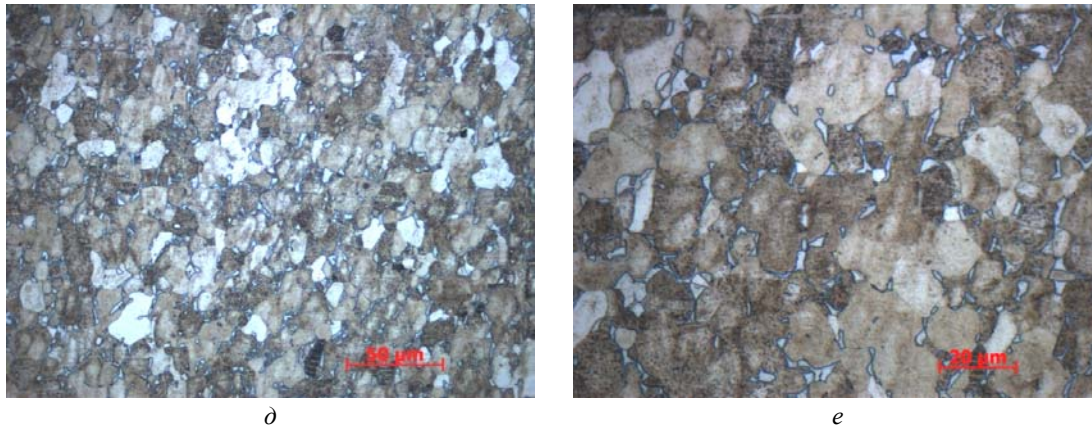


Рис. 2. Окончание

Fig. 2. Окончание

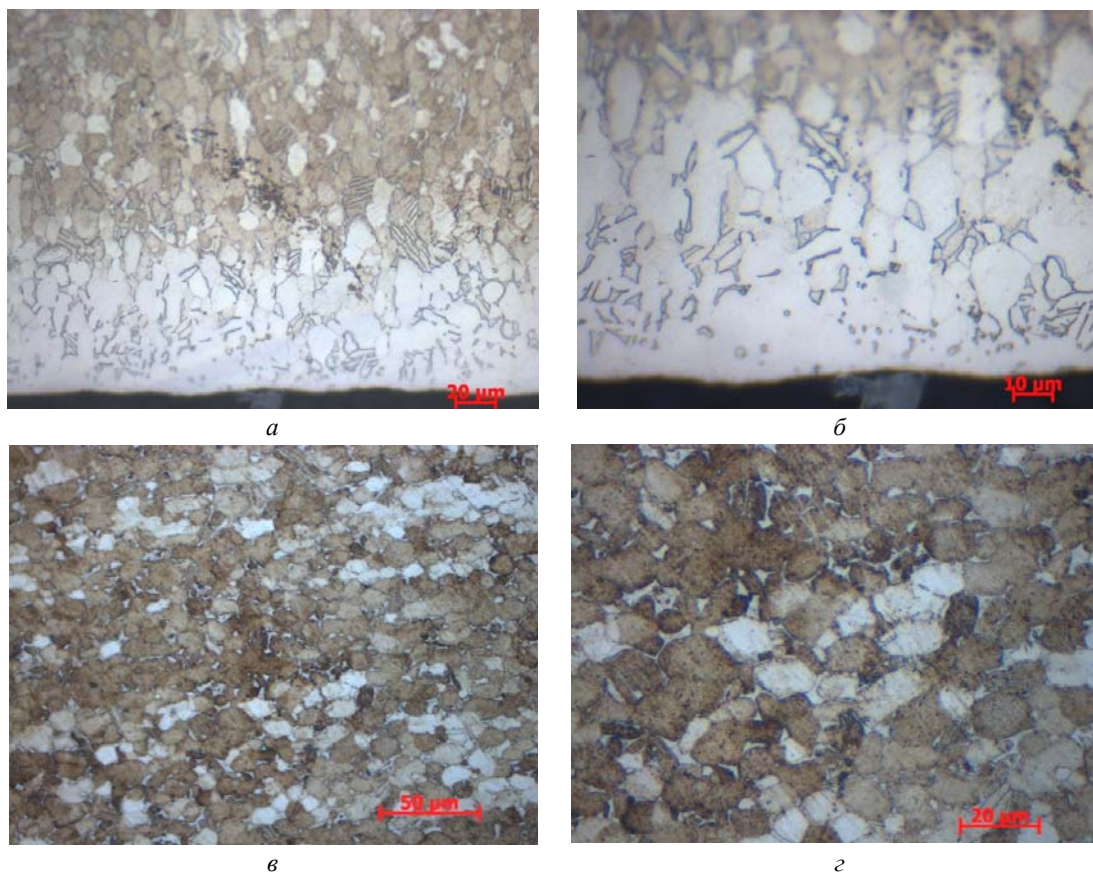


Рис. 3. Микроструктуры сплава ВТ6 после альфирования в вакууме:
а, б – поверхностный слой; в, г – центр образца; а, в – $\times 500$; б, г – $\times 1000$

Fig. 3. Microstructures of BT6 alloy after carbonation in vacuum:
а, б – surface layer; в, г – the center of the sample; а, в – $\times 500$; б, г – $\times 1000$

Исследование показало, что в центре образца присутствуют две фазы глобулярного (равноосные зерна) типа $\alpha + \beta$: α – светлая; β – темная (см. рис. 2, 3).

Выполнена статистическая обработка микроструктур после альфирования в графите (рис. 4, 7), а также после альфирования в вакууме (рис. 10) в программе SIAMS 700. Результаты представлены на гистограммах (рис. 5, 6, 8, 9, 11, 12).

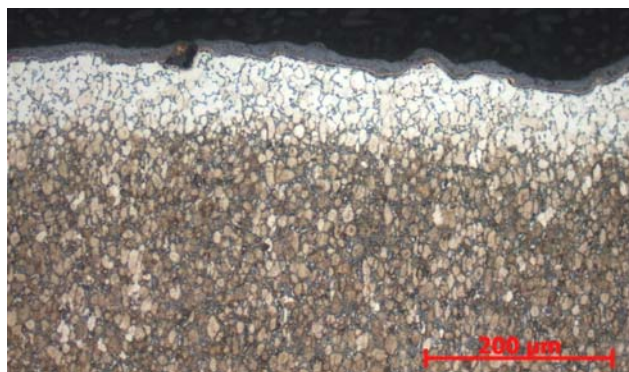


Рис. 4. Микроструктура сплава ВТ6 после альфирования в графите. ×200

Fig. 4. Microstructure of BT6 alloy after aluminizing in graphite. ×200

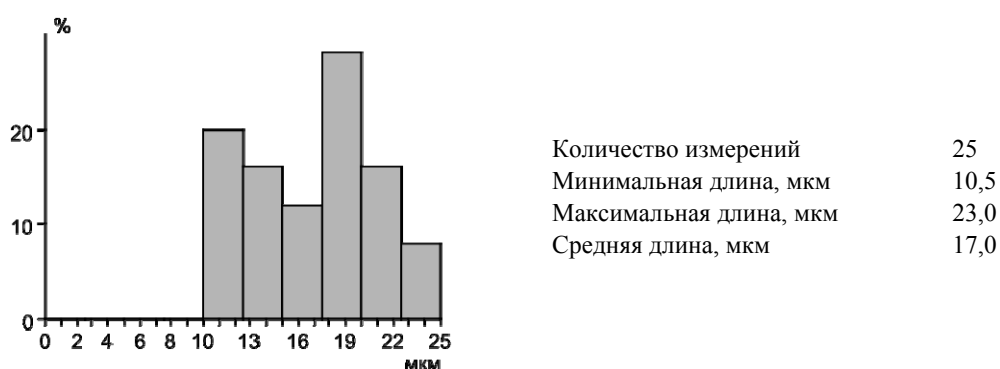


Рис. 5. Толщина тёмного слоя покрытия после альфирования в графите

Fig. 5. Thickness of the dark coating layer after aluminizing in graphite

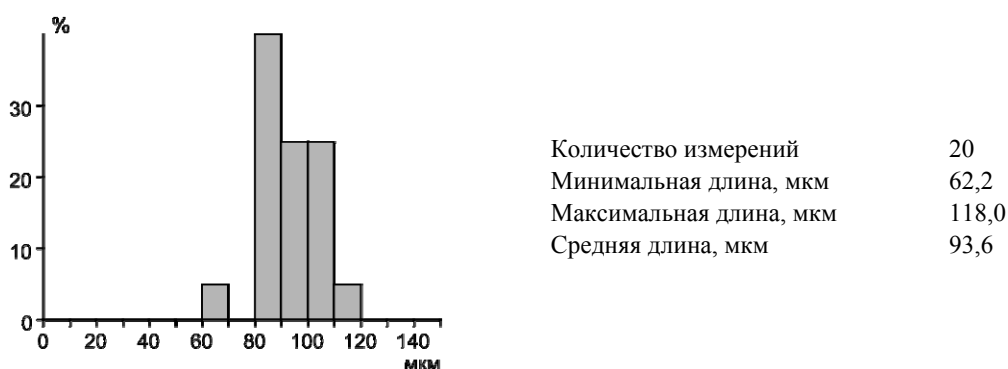


Рис. 6. Толщина светлого слоя после альфирования в графите

Fig. 6. Thickness of the light layer after aluminizing in graphite

После альфирования в графите выявлено несколько диффузионных слоев (рис. 4), которые отличаются по цвету. На поверхности образца наблюдается тонкий темный слой (окисная пленка) толщиной 17,0 мкм (средн.). Затем виден светлый альфированный слой толщиной 93,6 мкм (среднее значение). Общая толщина покрытия, рассчитанная путём сложения средних значений толщины темного и светлого слоёв, составляет 110,6 мкм (рис. 5, 6).

Также измеряли толщину слоя в образце после альфирования в графите по микроструктуре, показанной на рис. 7.

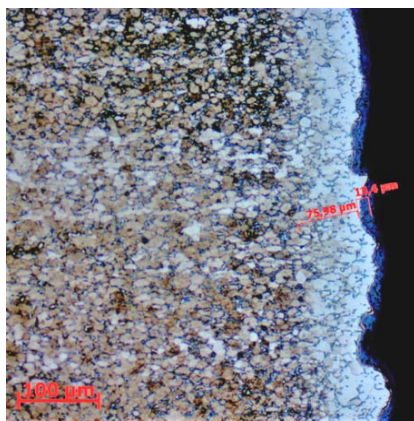
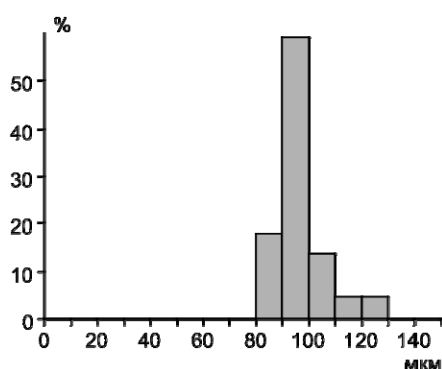


Рис. 7. Микроструктура сплава ВТ6 после альфирования в графите. ×200

Fig. 7. Microstructure of BT6 alloy after aluminizing in graphite. ×200



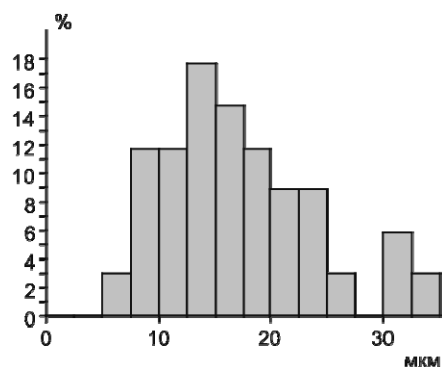
Количество измерений	22
Минимальная длина, мкм	80,3
Максимальная длина, мкм	122,7
Средняя длина, мкм	96,5

Рис. 8. Толщина покрытия после альфирования в графите (тёмный и светлый слои)

Fig. 8. Coating thickness after aluminizing in graphite (dark and light layers)

Средняя толщина покрытия (тёмного и светлого слоёв вместе) на рис. 7 составляет 96,5 мкм (рис. 8).

Определяли размер зерна в диффузионном слое, полученном после альфирования в графите (рис. 9). Среднее значение размера зерна 17,2 мкм.



Количество измерений	34
Минимальная длина, мкм	7,4
Максимальная длина, мкм	34,5
Средняя длина, мкм	17,2

Рис. 9. Размер зерна в диффузионном слое (альфирование в графите)

Fig. 9. Grain size in the diffusion layer (aluminizing in graphite)

Альфирование в вакууме (рис. 10) способствовало образованию светлого альфированного слоя толщиной 56,2 мкм (рис. 11). На поверхности слой окислов не выявлен.

Средний размер зерна в диффузионной зоне согласно рис. 12 составил 6 мкм (вакуум).

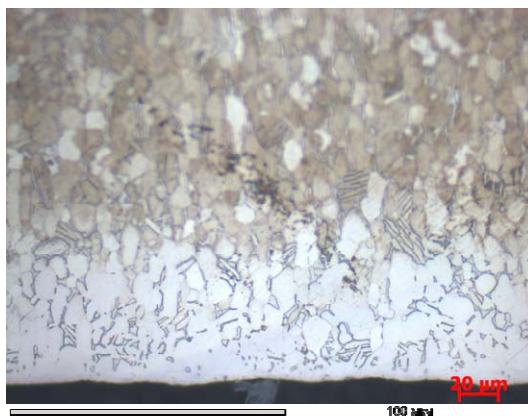


Рис. 10. Микроструктура сплава BT6 после альфирования в вакууме. $\times 500$

Fig. 10. Microstructure of BT6 alloy after alfa-firing in vacuum. $\times 500$



Рис. 11. Толщина слоя покрытия, полученного после альфирования в вакууме

Fig. 11. Thickness of the coating layer obtained after alfa-firing in vacuum



Рис. 12. Размер зерна в покрытии, полученном после альфирования в вакууме

Fig. 12. Grain size in the coating obtained after alfa-firing in vacuum

Согласно литературным данным [12], толщина покрытия изделия должна составлять ≥ 40 мкм. Предлагаемые технологии позволили получить слой (минимальные значения) ≥ 72 мкм (графит) и ≥ 49 мкм (вакуум), что обеспечивает выполнение требования к детали.

Структура деформированных титановых сплавов в значительной степени определяется температурно-скоростными условиями деформации [5].

В структуре возможно наличие двойников. Фаза α имеет ГП кристаллическую решетку. В титане с ГП решеткой направление двойникования $\langle 1011 \rangle$. Плоскость двойникования $\{1012\}$ [1; 2].

В альфированном слое (α -фаза, ГП решетка) в отдельных светлых зернах наблюдаются параллельные линии (пластины). Это может быть связано с полиморфным превращением титана при нагреве: β (ОЦК) $\rightarrow$ α (ГП). Согласно принципу структурного и размерного соответствия П.Д. Данкова и С. Т. Конобеевского, форма и ориентировка зародышей новой фазы при кристаллизации в анизотропной среде должны способствовать минимуму поверхностной энергии, а минимум получается при наибольшем сходстве в расположении атомов на соприкасающихся гранях старой и новой фаз. В титане при полиморфном превращении β (ОЦК) $\rightarrow$ α (ГП) взаимно параллельные плоскости: $\{001\}_\beta$ параллельна $\{110\}_\alpha$. Взаимно параллельные направления: $\langle 110 \rangle_\beta$ параллельно $\langle 111 \rangle_\alpha$. Лившиц Б. Г. в работе [21] поясняет, что в металлах «почти всегда при образовании новой фазы α внутри старой β между фазами наблюдается большее или меньшее структурное соответствие, то есть имеются плоскости и направления, сходные по расположению атомов. В случае достаточного соответствия форма кристаллов образующейся фазы зависит от анизотропии упругих свойств обеих фаз. Если модули упругости фазы α для всех направлений меньше, чем модули упругости фазы β , то фаза α при охлаждении выделится в виде пластин». Эту пластинчатую форму фазы α можно наблюдать на рис. 10.

Электронно-микроскопическое исследование. Изображения, полученные в ходе исследования на РЭМ, представлены на рис. 13–19. Ниже каждого изображения приведены данные о химическом составе выделенных областей (спектров).

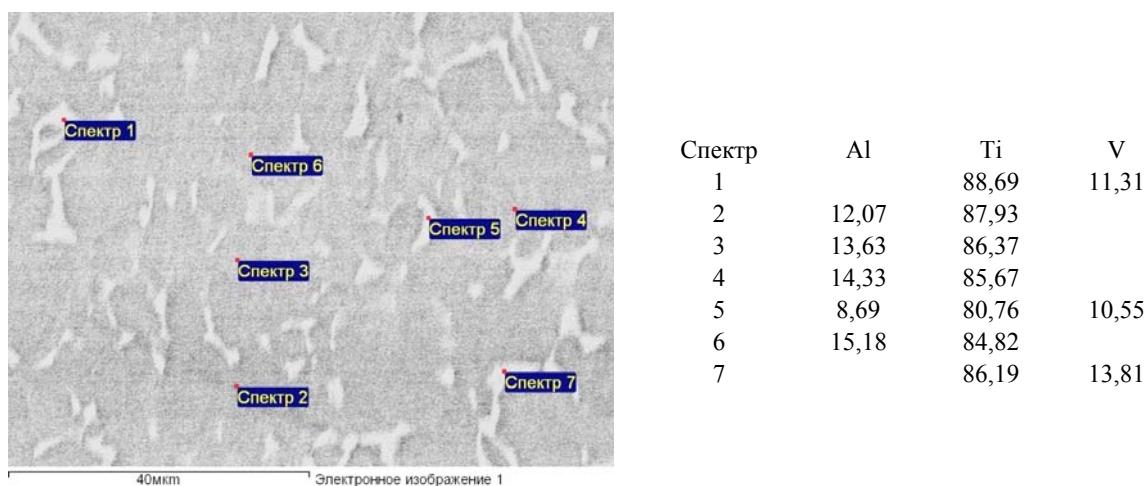
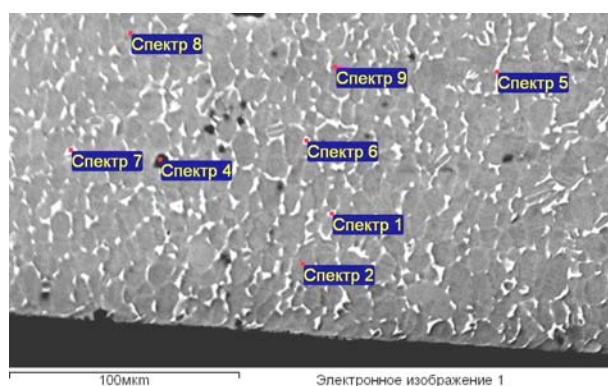


Рис. 13. Микроструктура и химический состав в спектрах (ат. %) сплава ВТ6 (графит, центр образца)

Fig. 13. Microstructure and chemical composition in spectra (at. %) of BT6 alloy (graphite, sample center)

Обнаружены зерна твердого раствора (спектр 2, рис. 13): 12,07 % алюминия; 87,93 % титана. Видны интерметаллиды: 88,69 % титана; 11,31 % ванадия (спектр 1); 8,69 % алюминия; 80,76 % титана; 10,55 % ванадия (спектр 5); 86,19 % титана; 13,81 % (ат.) ванадия (спектр 7).

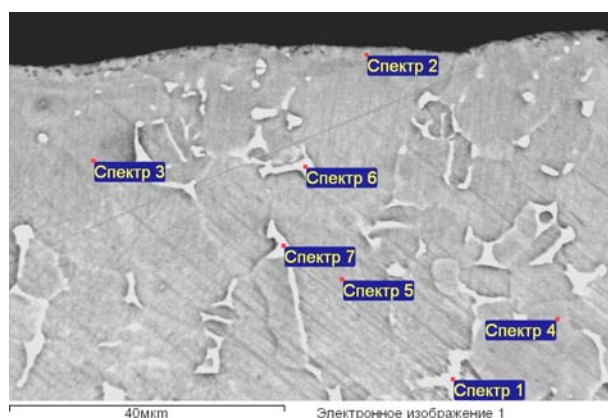
В структуре на рис. 14 видны зерна α -фазы (спектр 2: 78,68 % титана; 14,60 % алюминия). Выделения по границам зерен (спектр 1) – фаза, содержащая 12,32 % алюминия; 71,03 % титана; 10,58 % ванадия. Имеется фаза с кислородом (спектр 4): 77,26 % кислорода; 3,95 % алюминия; 12,64 % титана. Спектры 5, 6, 7 – фазы по границам зерен α – твердого раствора. Содержат 11,02–12,17 % алюминия; 68,73–70,66 % титана; 9,82–12,06 % ванадия. Спектр 8-фаза, содержащая 15,50 % алюминия и 78,80 % титана. Спектр 9 – твердый раствор на основе титана (90,23 % титана).



Спектр	O	Al	Ti	V
1		12,32	71,03	10,58
2		14,60	78,68	
4	77,26	3,95	12,64	
5		11,90	68,73	10,13
6		12,17	70,66	9,82
7		11,02	70,51	12,06
8		15,50	78,80	
9			90,23	

Рис. 14. Микроструктура и химический состав в спектрах (ат. %) альфированного слоя сплава BT6 (графит)

Fig. 14. Microstructure and chemical composition in the spectra (at. %) of the alphas layer of the alloy BT6 (graphite)



Спектр	Al	Ti	V
1	4,51	84,25	11,24
2	6,49	89,95	3,55
3	7,70	90,26	2,04
4	7,29	89,71	3,01
5	7,17	91,11	1,73
6	4,81	82,18	13,02
7	5,39	81,64	12,98

Рис. 15. Микроструктура и химический состав в спектрах (ат. %) альфированного слоя сплава BT6 (вакуум)

Fig. 15. Microstructure and chemical composition in the spectra (at. %) of the alphas layer of the BT6 alloy (vacuum)

В слое кислород не обнаружен (рис. 15). Выявлена область твердого раствора: 7,17 % алюминия; 91,11 % титана; 1,73 % ванадия (спектр 5). По границам видны интерметаллиды: 4,51 % алюминия; 84,25 % титана; 11,24 % ванадия (спектр 1); 4,81 % алюминия; 82,18 % титана; 13,02 % ванадия (спектр 6); 5,39 % алюминия; 81,64 % титана; 12,98 % (ат.) ванадия (спектр 7).

Ученые многих стран проявили интерес к изучению тройной диаграммы титан – алюминий – ванадий, так как сплавы этой системы важны для использования в различных областях современной промышленности. Так, в 2014 г. опубликована работа китайских учёных [21], в которой исследована тройная система Al–Ti–V. Выполнен анализ 42-х литературных источников. Приведены сведения о двойных системах Al–Ti, Ti–V, Al–V. Выполнено термодинамическое моделирование. Построены изотермические разрезы при 800, 900, 1000, 1100, 1200 °C. Получено хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными. Уточнены фазы тройной системы. Авторы считают [21], что работа позволит разрабатывать новые сплавы на основе системы Al–Ti–V.

Рентгенофазовый анализ. Изучали порошки двух образцов после оксидирования по двум технологиям. Обнаружены оксиды TiO_2 , Ti_3O , Ti_6O_{11} и нитрид титана TiN (рис. 16). В образце, альфированном в графите, в поверхностном слое выявлены фазы TiO_2 , Ti_3O , TiN . В образце, альфированном в вакууме – TiO_2 и Ti_6O_{11} .

Также выполнен рентгенофазовый анализ в центре образца. Выявлены фазы $\text{Al}_3\text{Ti}_{17}$ ($(\text{Al},\text{V})_3\text{Ti}_{17}$) – 94,8 %; $\text{Ti}_{0.7}\text{V}_{0.3}$ – 5,2 % (рис. 17).

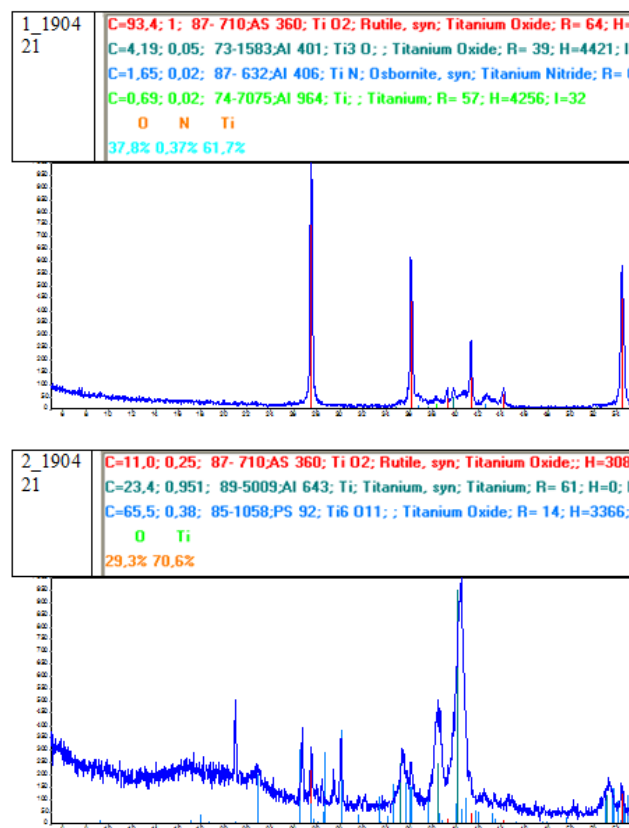


Рис. 16. Рентгенофазовый анализ сплава BT6 после альфирования в среде графита (1) и вакууме (2)

Fig. 16. X-ray phase analysis of BT6 alloy after alphonon in graphite medium (1) and in vacuum (2)

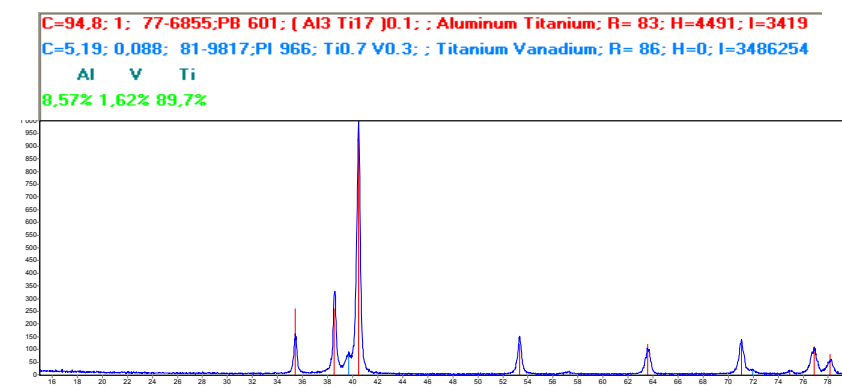


Рис. 17. Рентгенофазовый анализ сплава BT6 (центр)

Fig. 17. X-ray phase analysis of BT6 alloy (center)

Исследование микротвердости. Установлено, что химико-термическая обработка способствует существенному повышению микротвердости в диффузионном слое (рис. 18).

Альфирование в графите позволило получить микротвердость HV724 на расстоянии 10 мкм от поверхности. Затем значения микротвердости уменьшаются и при расстоянии 100 мкм микротвердость составляет HV315.

Альфирование в вакууме позволило получить микротвердость HV580 на расстоянии 10 мкм от поверхности. Затем значения микротвердости уменьшаются и при расстоянии 100 мкм микротвердость составляет HV320.

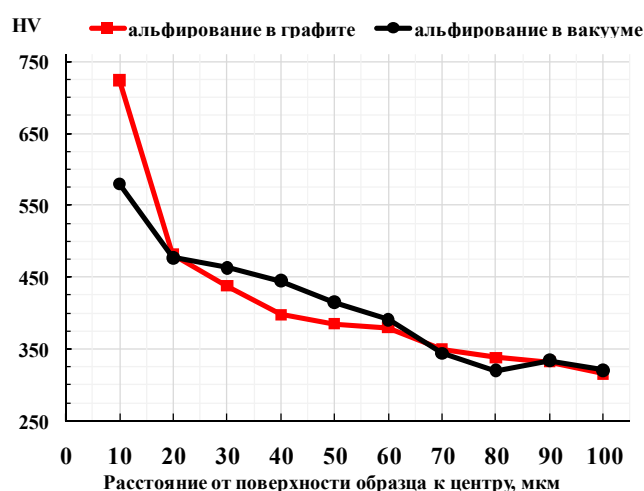


Рис. 18. Микротвердость альфированного сплава BT6

Fig. 18. Microhardness of the alphas alloy BT6

Исследование износостойкости. Результаты испытаний представлены на рис. 19.

Исследования позволили выяснить, что альфирование по двум технологиям обеспечивает износостойкость изделия, однако лучший результат получен после альфирования в вакууме.

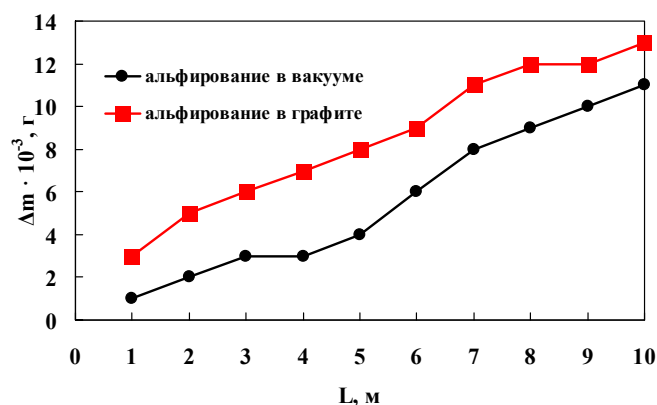


Рис. 19. Потеря массы образца (Δm) сплава BT6 при длине пути абразивного износа (L) 1–10 м после альфирования в графите и вакууме

Fig. 19. Loss of sample mass (Δm) of BT6 alloy at abrasive wear path length (L) of 1–10 m after alfaifling in graphite and in vacuum

Закключение

1. Выяснен фазовый состав и структура сплава BT6 после альфирования:

– в диффузионном слое после альфирования в графите обнаружены фазы TiO_2 ; Ti_3O ; TiN , после альфирования в вакууме – TiO_2 ; Ti_6O_{11} ;

– в альфированном слое после обработки в графите выявлены зерна α – твердого раствора, интерметаллиды $Ti-Al-V$, $Ti-V$ и $Ti-Al$; после обработки в вакууме содержится больше титана, также выявлены участки со 100 % (ат.) титана, видна область твердого раствора (α) и интерметаллиды $Ti-Al-V$, $Ti-V$ и $Ti-Al$.

Толщина оксидированного слоя составляет в среднем 103,6 мкм (графит), а в вакууме – 66,8 мкм. Средний размер зерна в слое составляет 17,2 мкм (графит); 6,0 мкм (вакуум).

2. Установлено, что химико-термическая обработка (альфирование) способствует существенному повышению микротвердости в диффузионном слое.

Альфирование в графите позволило получить на поверхности HV724 (10 мкм). Затем значения микротвердости уменьшаются и при расстоянии 100 мкм микротвердость составляет HV315.

Альфирование в вакууме позволило получить на поверхности HV580 (10 мкм). Затем значения микротвердости уменьшаются и при расстоянии 100 мкм микротвердость составляет HV320.

3. Исследования позволили выяснить, что альфирование в графите и вакууме обеспечивает износостойкость изделия, однако лучший результат получен после альфирования в вакууме.

4. Альфирование по двум технологиям способствует получению диффузионных слоёв толщиной более 40 мкм (по требованию конструкторской документации), приводит к повышению микротвердости и износостойкости. Однако можно рекомендовать альфирование сплава ВТ6 проводить в вакууме, так как данную технологию осуществляют в течение 2 ч вместо 8 ч (в графите).

Библиографические ссылки

1. Металловедение титана и его сплавов / С. П. Белов, М. Я. Брун, С. Г. Глазунов и др. ; под ред. Глазунова С. Г. и Колачева Б. А. М. : Металлургия, 1992. 352 с.
2. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М. : ВИЛС – МАТИ, 2009. 520 с.
3. Вульф Б. К. Термическая обработка титановых сплавов. М. : Металлургия, 1969. 376 с.
4. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов: монография / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др.; отв. ред. С. Г. Глазунов, Б. А. Колачев. М. : Металлургия, 1980. 464 с.
5. Титановые сплавы. Полуфабрикаты из титановых сплавов: монография / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар и др. М. : Металлургия, 1979. 512 с.
6. Сплавы цветных металлов для авиационной техники / В. М. Воздвиженский, А. А. Жуков, А. Д. Постнова, М. В. Воздвиженская ; под общ. ред. В. М. Воздвиженского. Рыбинск : РГАТА, 2002. 219 с.
7. Титан и его сплавы. М. : Изд-во АН СССР, 1958. Вып. 1. 209 с.
8. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. Л. – М. : Машиностроение, 1977. 248 с.
9. Petzow Ed. G., Effenberg G. Ternary Alloys // Weinheim. VCH, 1990. Vol. 3. P. 646.
10. Матчин И. Е. Альфирование титановых сплавов в вакууме // Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (11–15 ноября 2019, г. Красноярск) : в 2-х ч. Красноярск, 2019. Ч. 1. С. 262–263.
11. Чэн Жуй. Влияние альфирования и азотирования сплава ВТ6 на структуру, толщину покрытия и твердость зоны обработки // Студенческая научная весна 2017: Машиностроительные технологии : Всерос. науч.-техн. конф. студентов. М., 2017. С. 1–2.
12. Прокопьев И. В., Жуковский В. Б. Создание износостойкого покрытия деталей из титановых сплавов методом альфирования поверхности // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (12–14 ноября 2013, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 2. С. 435.
13. Пат. 2550674 Российская Федерация, МПК C22F 1/18, C23C 8/10. Способ получения износостойких покрытий на поверхности изделий из титана и его сплавов / Н. А. Андреева, Т. И. Днепровская, С.Н. Трусевич; заявитель и патентообладатель ОАО «Информационные спутниковые системы» им. ак. М.Ф. Решетнёва» – № 2013113437/02 ; заявл. 26.03.2013 ; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. 6 с.

14. А.с. СССР 816195 А1, МПКС23С 8/10 (2006.01). Способ оксидирования титановых спутниковые системы» им. ак. М. Ф. Решетнёва» – № 2013113437/02 ; заявл. 26.03.2013; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. 6 с. сплавов / Рыженков И. Н., Колачев Б. А., Данилов Ю. П., Киселева А. Б. (СССР). – № 2839586/02 : заявл. 19.11.1979 :опубл. 10.03.2006, Бюл. № 7. 1 с.
15. Siva Rama Krishna D., Brama Y. L., Sun Y. Thick rutile layer on titanium for tribological applications // Tribology International. 2007. Vol. 40. P. 329–334.
16. Effect of surface treatment by ceramic conversion on the fretting behavior of NiTi shape memory alloy / Н. Yang, Z. Qian, X. Ju. Zhou, Н. Don // Tribology Letters. 2007. Vol. 25, No. 3. P. 215–224.
17. ГОСТ 19807–91 Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. Взамен ГОСТ 19807-74; введ. 01.07.1992. М. : Стандартинформ, 1992. 6 с.
18. ГОСТ 9450–76 (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (с Изменениями N 1, 2). М. : Издательство стандартов, 1993. 31 с.
19. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 3. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. М. : Машиностроение, 2001. 872 с.
20. Murray J. L., Wriedt H. A. // Bull. Alloy Phase Diagrams. 1987. Vol. 8, No. 2. P. 148–165.
21. Лившиц, Б. Г. Металлография. М. : Металлургия, 1990. 336 с.
22. Thermodynamic Modeling of the Al-Ti-V Ternary System / X. Lu, Na Gui, A. Qiu, G. Wu, C. Li. // Metallurgical and Materials Transactions A. 2014. 10 p.

References

1. Belov S. P., Brun M. Ya., Glazunov S. G. et al. *Metallovedenie titana i ego spлавov* [Metallurgy of titanium and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992, 352 p.
2. Il'in A. A., Kolachev B. A., Pol'kin I. S. *Titanovy'e splavy'. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik* [Titanium alloys. Composition, structure, properties. Handbook]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009, 520 p.
3. Vul'f B. K. *Termicheskaya obrabotka titanovy'kh spлавov* [Heat treatment of titanium alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 376 p.
4. Borisova E.A., Bochvar G.A., Brun M. Ya. et al. *Titanovy'e splavy'. Metallografiya titanovy'kh spлавov: monografiya* [Titanium alloys. Metallography of titanium alloys: monograph]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 464 p.
5. Aleksandrov V. K., Anoshkin N. F., Bochvar G. A. et al. *Titanovy'e splavy'. Polufabrikaty' iz titanovy'kh spлавov: monografiya* [Titanium alloys. Semi-finished products from titanium alloys: monograph]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 512 p.
6. Vozdvizhenskij V. M., Zhukov A. A., Postnova A. D., Vozdvizhenskaya M. V. Pod obshh. red. V. M. Vozdvizhenskogo. *Splavy' czvetny'kh metallov dlya aviacionnoj tekhniki* [Non-ferrous metal alloys for aviation technology]. Ry'binsk: RGATA Publ., 2002, 219 p.
7. *Titan i ego splavy* [Titanium and its alloys]. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR Publ., No. 1, 1958, 209 p.
8. Chechulin B. B., Ushkov S. S., Razuvaeva I. N., Gol'dfajn V. N. *Titanovy'e splavy' v mashinostroenii* [Titanium alloys in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 248 p.
9. Petzow Ed. G., Effenberg G. *Troyney splavy* [Ternary Alloys]. Weinheim, VCH, 1990, Vol. 3, 646 p.
10. Matchin I. E. [Alfaling of titanium alloys in vacuum]. *Materialy XXIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2019, Ch. 1. P. 262–263. (In Russ.)
11. Che'n Zhuj [Influence of alphanizing and nitriding of BT6 alloy on the structure, coating thickness and hardness of the processing zone]. *Materialy Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya*

konferenciya studentov. Studencheskaya nauchnaya vesna 2017: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet im. N. E. Baumana. Moscow, 2017, P. 1–2. (In Russ.)

12. Prokop'ev I. V., Zhukovskiy V. B. [Creation of wear-resistant coating of titanium alloy parts by surface alphonizing] *Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013, Ch. 2. P. 435. (In Russ.)

13. Andreeva N. A., Dneprovskaya T.I., Trusevich S.N. *Sposob polucheniya iznosostojkikh pokry'tiy na poverkhnosti izdeliy iz titana i ego splavov* [Method of obtaining wear-resistant coatings on the surface of products made of titanium and its alloys]. Patent RF, No. 2550674, 2015.

14. Ry'zhenkov I. N., Kolachev B. A., Danilov Yu. P., Kiseleva A. B. *Sposob oksidirovaniya titanovy'kh splavov* [Method of oxidation of titanium alloys]. A.s. SSSR, No. 816195, 1979 (2006).

15. Siva Rama Krishna D., Brama Y. L., Sun Y. [Thick rutile layer on titanium for tribological applications]. *Tribology International*. 2007, Vol. 40, P. 329–334.

16. Yang H., Qian Z., Zhou X. Ju, Don H. [Effect of surface treatment by ceramic conversion on the fretting behavior of NiTi shape memory alloy]. *Tribology Letters*. 2007, Vol. 25, No. 3, P. 215–224.

17. *GOST 19807–91. Titan i splavy' titanovy'e deformiruemye. Marki* [Titanium and titanium alloys are deformable. Brand]. Moscow, Standartinform Publ., 1992. 6 p.

18. *GOST 9450–76. Izmerenie mikrotverdsti vdavlivaniem almazny'kh nakonechnikov (s Izmeneniyami N 1, 2)* [Measurement of microhardness by indentation of diamond tips (with Changes N 1, 2)]. Moscow, Standartinform Publ., 1993. 31 p.

19. *Diagrammy' sostoyaniya dvoyny'kh metallicheskich sistem: spravochnik: V 3t.: T.3. Kn.1 / pod obshh. red. N. P. Lyakisheva*. [Diagrams of the state of double metal systems: handbook: B 3t.: T.3. Kn.1 / pod obshch. red. N. P. Lyakisheva]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, 872 p.

20. Murray J. L., Wriedt H. A. *Bull. Alloy Phase Diagrams*. 1987, Vol. 8, No. 2, P. 148–165.

21. Livshits, B. G. *Metallography*. Moscow, Metallurgy Publ., 1990, 336 p.

22. Lu X., Gui Na, Qiu A., Wu G., Li C. [Thermodynamic Modeling of the Al-Ti-V Ternary System]. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014, August, 10 P. DOI: 10.1007 / s11661-014-2317-y.

© Лекарев А. В., Юрчук Л. И., Меркулова Г. А., 2023

Лекарев Александр Владимирович – главный металлург; АО «Красноярский машиностроительный завод». E-mail: racerlec@mail.ru.

Юрчук Лев Игоревич – инженер; Институт химии и химической технологии СО РАН. E-mail: yurchuk.lev@yandex.ru.

Меркулова Галина Александровна – кандидат технических наук, доцент, кафедра металловедения и термической обработки металлов имени В. С. Биронта; институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: gam1602@mail.ru.

Lekarev Alexander Vladimirovich – Chief Metallurgist, JSC “Krasnoyarsk Machine-Building Plant”. E-mail: racerlec@mail.ru.

Yurchuk Lev Igorevich – Engineer; Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS. E-mail: yurchuk.lev@yandex.ru.

Merkulova Galina Alexandrovna – Cand. Sc., Associate Professor, Department of Metal Science and Heat Treatment of Metals named after V. S. Biront; Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science, Siberian Federal University. E-mail: gam1602@mail.ru.
