Пячин С. А., Бурков А. А., Мокрицкий Б. Я., Власова Н. М.
S. A. Pyachin, A. A. Burkov, B. Ya. Mokritskii, N. M. Vlasova

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ Ti_3Al ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ДОБАВКИ B_4C И ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА

PROPERTIES OF Ti_3Al ELECTROSPARK COATINGS DEPENDING ON B_4C ADDITIVE CONCENTRATION AND ANNEALING TEMPERATURE

Пячин Сергей Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией функциональных материалов и покрытий Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; тел.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: pyachin@mail.ru.

Mr. Sergei A. Pyachin – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, associate Professor, head of laboratory of functional materials and coatings, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 153 Tikhookeanskaya str.; tel.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: pyachin@mail.ru.

Бурков Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; тел.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: burkovalex@mail.ru.

Mr. Alexander A. Burkov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, researcher, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 153 Tikhookeanskaya str.; tel.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: burkovalex@mail.ru.

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: boris@knastu.ru.

Власова Нурия Мунавировна – кандидат технических наук, научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; тел.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: vlasova64@yandex.ru.

Ms. Nuriya M. Vlasova – PhD in Engineering, researcher, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 153 Tikhookeanskaya str.; tel.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: vlasova64@yandex.ru.

Аннотация. Изучено влияние отжига в вакууме на характеристики электроискровых покрытий из алюминидов титана Ti_3Al с добавками B_4C на титановом сплаве $Ti6Al4V$. Установлено, что составы осаждённых слоёв изменяются после нагрева при температурах выше 600 °C за счёт образования оксида титана TiO и снижения концентрации боридов TiB и TiB_2 . В результате высокотемпературного отжига микротвёрдость покрытия $Ti_3Al+5\%B_4C$ возросла в 2,3 раза, а износостойкость электроискровых $Ti_3Al+10\%B_4C$ покрытий – в 3 раза. Коэффициент трения всех покрытий снизился на 10 – 15 %.

Summary. The effect of vacuum annealing on the characteristics of titanium aluminide Ti_3Al coatings with B_4C additives on $Ti6Al4V$ titanium alloy was investigated. It was established that the compositions of the deposited layers changed after annealing at temperatures above 600 °C due to the formation of titanium oxide TiO and the decrease in the concentrations of borides TiB and TiB_2 . Due to the high-temperature annealing, the microhardness of the $Ti_3Al+5\% B_4C$ coating increased in 2.3 times, and the wear resistance of the electric spark $Ti_3Al+10\% B_4C$ coating increased in 3 times. The friction coefficient of all coatings decreased by 10 – 15%.

Ключевые слова: электроискровое легирование, покрытие, интерметаллид, карбид бора, состав, отжиг, микротвёрдость, износостойкость.

Key words: electrospray alloying, coating, intermetallic, boron carbide, composition, annealing, microhardness, wear resistance.

УДК 621.762;537.523.4

Введение

Титановые сплавы применяют в различных отраслях промышленности (аэрокосмической, автомобильной, биомедицинской и др.) благодаря их коррозионной стойкости, малому удельному весу, высокой прочности и биосовместимости [2; 20]. Тем не менее изделия из титана не лишены недостатков, к которым относятся высокая вязкость при трении, низкая термостойкость и высокая температура охрупчивания. Свойства титановых сплавов можно улучшить модифицированием их состава и структуры, а также нанесением защитных покрытий [1; 4; 8]. При выборе материалов для нанесения покрытий на титан предпочтительны алюминиды титана, которые обладают высокой адгезией и устойчивостью к воздействию высоких температур и агрессивных сред [3; 13; 14; 19; 15; 18]. Эффективность интерметаллидных слоёв можно повысить добавлением жаростойких и упрочняющих соединений, таких как оксиды циркония, титана [21], нитриды хрома, никеля, титана [11; 16], карбиды тантала и бора [10; 17].

Метод электроискрового легирования перспективен для формирования интерметаллидных покрытий на основе сплавов титана с алюминием [5]. Электроискровое осаждение алюминида Ti_3Al с добавками TiC и B_4C на сплав ВТ20 повышает его устойчивость к газовой коррозии при температуре 900 °С и износостойкость поверхности титанового сплава в 4 – 6 раз [6; 7]. Проведённые исследования были нацелены на изучение влияния концентрации добавки карбида бора и температуры изотермического отжига на фазовый состав и характеристики электроискровых покрытий из интерметаллида Ti_3Al на титановом сплаве $Ti6Al4V$.

Материалы и методы исследования

Электроискровые покрытия получены с использованием установки IMES-40 с ручным электромагнитным вибратором и генератором импульсов тока. Легирующие электроды были изготовлены перемешиванием порошков Ti и Al в мольном соотношении 3:1 и карбида B_4C в количестве 5, 10, 15 масс. %) с последующим спеканием в вакууме при температуре 1400 °С. Составы спечённых электродов отличались от составов исходных порошков (см. табл. 1), что объясняется твердофазным химическим взаимодействием карбида бора с титаном и алюминием в условиях высоких температур с образованием соединений – карбида и диборида титана, а также сложного карбида $Ti_4Al_2C_2$. Содержание последнего растёт с ростом концентрации B_4C в исходной смеси порошков. Покрытия нанесли на подложки из титанового сплава $Ti6Al4V$ (Ti – 88,1...90,4 %; Al – 5,5...6,75 %; V – 3,5...4,5 %; Fe – 0,4 %; O – 0,1 %). Подложки имели форму дисков диаметром 12 мм и высотой 5 мм. Во время осаждения покрытий электроды обдували аргоном, чтобы избежать окисления металлов. Частота повторения импульсов тока – 1 кГц, длительность импульсов – 100 мкс, амплитуда импульсов тока – 110 ± 10 А при напряжении между электродами 30 ± 5 В. Продолжительность осаждения покрытий – 5 мин.

Таблица 1

Фазовые составы электродов и покрытий*

Обозначение	Электрод	Покрытие
Ti_3Al	Ti_3Al	TiN , Ti_3Al
$Ti_3Al+5\%B_4C$	Ti_3Al , TiB_2 , TiC	TiB , Ti_3Al , αTi , TiB_2
$Ti_3Al+10\%B_4C$	Ti_3Al , TiB_2 , TiC , $Ti_4Al_2C_2$	TiB , TiB_2 , Ti_3Al , αTi
$Ti_3Al+15\%B_4C$	$Ti_4Al_2C_2$, Ti_3Al , TiB_2 , TiC	TiB_2 , TiB , αTi , Al_2O_3 , Ti_3Al
*Примечание – Соединения указаны в порядке убывания концентрации		

Термическая обработка (ТО) титанового сплава с покрытиями проводилась следующим образом: образцы нагревали и выдерживали при температуре из диапазона 500 – 1100 °С в течение 1 часа в вакуумной печи Carbolite STF при остаточном давлении 1,3 Па. Затем печь выключали, и образцы медленно остывали до комнатной температуры.

Микроструктуру покрытий исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA с энергодисперсионным спектрометром X-MAX в центре коллективного пользования Института тектоники и геофизики имени Ю. А. Косыгина ДВО РАН. Фазовый состав электродов и покрытий определяли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в излучении Cu-Kα. Рентгеновские линии идентифицировали с использованием программы PDWin и базы PDF-2 Международного центра дифракционных данных ICDD.

Стойкость покрытий к истиранию оценивали в соответствии со стандартом ASTM G99-04 в режиме скольжения по поверхности контртела – вращающегося диска из быстрорежущей стали Р6М5. Скорость вращения диска – 720 об/мин. Давление на испытуемый образец – 25 Н. Общая длина пути скольжения – 11 км. Потерю массы образцов из-за истирания определяли с помощью электронных весов с точностью 0,1 мг. Износостойкость рассчитывали как величину, обратную к интенсивности весового изнашивания, равную отношению потери массы образца при трении к длине пути скольжения.

Электрохимические измерения проводились с применением потенциостата 8Р-nano в трёхэлектродной ячейке с естественной аэрацией. В качестве тестового электролита использован 3,5%-й раствор NaCl при температуре 25 °С, а в качестве электрода сравнения – стандартный хлорсеребряный электрод в растворе KCl. Контрэлектрод – платиновый «ЭТП-02». Титановый сплав Ti6Al4V без покрытий и с покрытиями служил рабочим электродом. Перед началом поляризационного сканирования образцы катода поляризовались при 1 В в течение 5 мин с последующей стабилизацией в течение 1 часа. Сканирование осуществлялось в диапазоне от -1,5 В до 2,0 В со скоростью 1 мВ/с. Активная экспозиция к используемым растворам электролита составляла 1 см². Поляризационные параметры определены экстраполяцией катодных и анодных наклонов кривых Тафеля с использованием метода Стерна – Гири.

Результаты и обсуждение

Согласно металлографическому и микрорентгеноспектральному анализу покрытие представляет собой композиционный материал, состоящий из металлической матрицы с включениями (см. рис. 1).

Рис. 1. СЭМ-изображение сечения покрытия Ti₃Al+15%B₄C на сплаве Ti6Al4V до отжига

Тёмные области соответствуют повышенной концентрации алюминия и кислорода, то есть оксида алюминия Al₂O₃, а области серого цвета – это сосредоточение титана и бора, то есть бориды титана TiB₂. С увеличением расстояния от поверхности вглубь подложки содержание бора

снижается с 40 до 5 ат. %, а концентрация титана возрастает с 20 до 80 ат. %. Средняя толщина осаждённых слоёв уменьшается с 70 мкм для Ti_3Al -покрытия до 24 мкм для $Ti_3Al+15\%B_4C$ покрытия по мере роста концентрации B_4C .

Фазовые составы электроискровых покрытий отличаются от электродов, с применением которых они были получены (см. табл. 1). Покрытие Ti_3Al помимо основного интерметаллида Ti_3Al содержит нитрид титана TiN , образовавшийся в результате взаимодействия титана с азотом, который содержался в потоке защитного газа. В покрытиях $Ti_3Al+5\%B_4C$ и $Ti_3Al+10\%B_4C$ преобладает моноборид титана TiB . При повышении концентрации бора в анодном материале концентрация диборида TiB_2 в осаждённом слое заметно увеличивалась по сравнению с TiB . В покрытиях $Ti_3Al+10\%B_4C$ и $Ti_3Al+15\%B_4C$ также присутствует $\alpha-Ti$, который проникает из титановой подложки в поверхностный слой. Покрытие $Ti_3Al+15\%B_4C$ содержит также незначительное количество оксида алюминия Al_2O_3 .

Фазовые составы электроискровых полученных покрытий не претерпевают значительных изменений при нагреве до 600 °С, однако дальнейшее повышение температуры отжига приводит к окислению компонентов осаждённых слоёв. Так, в поверхностном слое из Ti_3Al без добавок после отжига при температурах более 600 °С образуется оксид титана Ti_2O_3 , а при температурах выше 800 °С – TiO (см. рис. 2, а). Окисление металлов возможно благодаря наличию кислорода как примеси в титановом сплаве и присутствию его в разрежённом воздухе при давлении 1,3 Па.

Примечательно также, что алюминий выявляется в покрытии Ti_3Al как отдельная фаза после отжига при температурах выше 700 °С, то есть при превышении его температуры плавления. При этом содержание интерметаллида Ti_3Al падает. В покрытиях Ti_3Al с добавками карбида бора рост температуры изотермического нагрева выше 600 °С сопровождается падением концентрации боридов TiB и TiB_2 с одновременным увеличением концентрации оксида титана TiO (см. рис. 2, б – г).

Микротвёрдость осаждённых $Ti-Al-B-C$ покрытий равна 6,6 – 8,9 ГПа (см. табл. 2), что выше в 2-3 раза, чем у подложки – сплава $Ti6Al4V$ (3 ГПа). Сравнивая микротвёрдость покрытий до и после отжига, можно сделать заключение, что она слабо изменяется в результате термической обработки. Исключение составляет покрытие $Ti_3Al+5\%B_4C$ на титановом сплаве $Ti6Al4V$. Его микротвёрдость в 2,3 раза больше, чем у аналогичного покрытия, не подвергнутого отжигу.

Таблица 2

Микротвёрдость (HV), износостойкость (W) и коэффициент трения (μ) электроискровых покрытий без и после отжига при 1100 °С

Характеристика		Покрытие			
		Ti_3Al	$Ti_3Al+5\%B_4C$	$Ti_3Al+10\%B_4C$	$Ti_3Al+15\%B_4C$
HV , ГПа	Без ТО	$6,6 \pm 1,2$	$8,4 \pm 1,3$	$8,9 \pm 1,4$	$8,3 \pm 1,3$
	После ТО	$8,1 \pm 1,1$	$19,6 \pm 2,1$	$8,1 \pm 1,2$	$8,4 \pm 1,1$
W , км/мг	Без ТО	$6,6 \pm 0,5$	$7,7 \pm 1,8$	$7,6 \pm 1,6$	$13,6 \pm 3,1$
	После ТО	$3,2 \pm 0,6$	$3,6 \pm 0,4$	$22,5 \pm 4,1$	$11,7 \pm 2,3$
μ	Без ТО	$0,52 - 0,59$	$0,48 - 0,57$	$0,48 - 0,55$	$0,46 - 0,52$
	После ТО	$0,49 - 0,54$	$0,43 - 0,52$	$0,39 - 0,47$	$0,40 - 0,47$

В режиме скользящего изнашивания титанового сплава относительно стали Р6М5 реализуются окислительный и адгезионный механизмы износа. Испытания образцов в режиме сухого скольжения показали, что за счёт осаждения электроискровых покрытий на титановый сплав $Ti6Al4V$ удаётся значительно улучшить его износостойкость. Износостойкость непокрытого титанового сплава составляет 0,075 км/мг, а износостойкость сплава с покрытиями – выше 6,6 км/мг (см. табл. 2). Влияние изотермического отжига на износ образцов не так однозначно. Для покрытий Ti_3Al , $Ti_3Al+5\%B_4C$, $Ti_3Al+15\%B_4C$ износостойкость после термической обработки снижается в 1,2 – 2,2 раза, а для покрытия $Ti_3Al+10\%B_4C$ – увеличивается в 3,3 раза.

Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы покрытий после отжига при разных температурах:
а – Ti_3Al ; б – $Ti_3Al+5\%B_4C$; в – $Ti_3Al+10\%B_4C$; г – $Ti_3Al+15\%B_4C$

Коэффициент трения полученных покрытий (см. табл. 2) после 2 км длины пути истирания принимает значения в диапазоне 0,46 – 0,59. Наблюдается тенденция к снижению коэффициента трения с увеличением концентрации добавки карбида бора. После изотермического отжига коэффициент трения образцов уменьшается на 10 – 15 %.

Результаты потенциодинамических поляризационных испытаний образцов с покрытиями (см. рис. 3, а и табл. 3) показали, что добавка карбида бора снижает E_{corr} для Ti_3Al покрытий. Однако I_{corr} повышается с ростом содержания добавки в 4,5 раза, а R_p снижается почти в 3 раза для образцов Ti_3Al и $Ti_3Al+15\%B_4C$, что свидетельствует об ухудшении коррозионной стойкости Ti_3Al покрытий с повышением содержания бора и углерода. После отжига образцов при температуре 1100 °С наблюдаются аналогичные закономерности: ток коррозии повышается, а сопротивление поляризации уменьшается с ростом содержания бора и углерода в покрытиях. Анализ результатов поляризационных испытаний образцов до и после высокотемпературной выдержки показал, что отжиг образцов приводит к повышению I_{corr} и снижению R_p в 1,4 – 4,6 и 1,4 – 5 раз соответственно. При отжиге образцов также наблюдалось повышение потенциала коррозии на 10 %. Таким образом, полученные электрохимические параметры показывают снижение коррозионной стойкости покрытий на основе интерметаллида Ti_3Al с добавками карбида бора после отжига при температуре 1100 °С. Аналогичное поведение титановых сплавов при отжиге наблюдалось ранее [9; 12]. В работе [9] было показано, что отжиг титанового сплава Ti_6Al_4V при температуре 800 °С приводит к повышению I_{corr} в 2,3 раза и снижению R_p в 3 раза.

Рис. 3. Потенциодинамические поляризационные кривые электроискровых покрытий:
а – без отжига; б – после отжига при температуре 1100 °С.
Обозначения линий: 1 – покрытие Ti_3Al ; 2 – покрытие $Ti_3Al+5\%B_4C$;
3 – покрытие $Ti_3Al+10\%B_4C$; 4 – покрытие $Ti_3Al+15\%B_4C$

Таблица 3

Потенциал коррозии (E_{corr}), плотность тока коррозии (I_{corr}) и поляризационное сопротивление (R_p) электроискровых покрытий без и после отжига при 1100 °С

Характеристика		Покрытие			
		Ti_3Al	$Ti_3Al+5\%B_4C$	$Ti_3Al+10\%B_4C$	$Ti_3Al+15\%B_4C$
E_{corr} , В	Без ТО	-0,32	-0,25	-0,26	-0,29
	После ТО	-0,37	-0,28	-0,30	-0,28
I_{corr} , мкА/см ²	Без ТО	0,84	1,29	3,10	3,80
	После ТО	3,89	4,94	4,46	5,26
R_p , кОм	Без ТО	321	354	119	111
	После ТО	193	72	71	77

Выводы

Изотермический нагрев электроискровых Ti_3Al покрытий с добавками карбида бора на титановом сплаве $Ti6Al4V$ выше 600 °С в вакууме приводит к изменению их фазового состава. В поверхностном слое из интерметаллида Ti_3Al после отжига образуются оксиды Ti_2O и TiO . Их концентрация увеличивается с ростом температуры нагрева. В интерметаллидных покрытиях с добавками карбида бора под действием термической обработки снижается содержание боридов TiB и TiB_2 , а концентрация оксида титана TiO повышается. Микротвёрдость полученных покрытий превышает в 2-3 раза микротвёрдость титановой подложки, при этом положительное влияние высокотемпературного нагрева в увеличении твёрдости характерно только для покрытия из $Ti_3Al+5\%B_4C$, микротвёрдость которого достигает около 20 ГПа. Стойкость интерметаллидных покрытий к износу при трении скольжения относительно стали Р6М5 на два порядка выше, чем у сплава $Ti6Al4V$ без покрытий. Отжиг Ti_3Al покрытия с 15 масс. % добавкой карбида бора при температуре 1100 °С повышает его износостойкость в 3,3 раза. Коэффициент трения всех покрытий после термической обработки уменьшился примерно на 10 – 15 %, однако коррозионная стойкость покрытий на основе интерметаллида Ti_3Al с добавками карбида бора снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава ВТ4-1 с жаростойкими покрытиями / Д. А. Александров, С. А. Мубояджян, А. М. Гаямов, Д. С. Горлов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № 5. – С. 61-66.
2. Горынин, И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. – М: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Имаев, В. М. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных γ -TiAl сплавов / В. М. Имаев, Р. М. Имаев, Т. И. Оленева // *Письма о материалах*. – 2011. – Т.1. – № 1. – С.25-31.
4. Формирование термически стабильной структуры в титановом сплаве с повышенным содержанием алюминия при термоводородной обработке / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, О. Н. Гвоздева, В. А. Пожого // *Титан*. – 2012. – № 2(36). – С. 4-10.
5. Пячин, С. А. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана / С. А. Пячин, А. А. Бурков, В. С. Комарова // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2013. – Вып. 6. – С. 16-24.
6. Влияние добавок оксидов и карбидов металлов на свойства интерметаллидных Ti₃Al электроискровых покрытий / С. А. Пячин, А. А. Бурков, Н. М. Власова, Е. А. Кириченко // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2016. – Т. 13. – № 2. – С. 168-173.
7. Износостойкость и жаростойкость электроискровых покрытий на основе Ti₃Al с добавкой карбида бора // С. А. Пячин, А. А. Бурков, Н. М. Власова, Е. А. Кириченко, Б. Я. Мокрицкий, Е. Р. Зайкова // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2017. – № 1-1(29). – С. 49-55.
8. Семенова, И. П. Наноструктурные титановые сплавы: новые разработки и перспективы применения / И. П. Семенова, Г. И. Рааб, Р. З. Валиев // *Российские нанотехнологии*. – 2014. – Т. 9. – № 5-6. – С. 84-95.
9. Anandan, C. Effect of PostNitride Annealing on Wear and Corrosion Behavior of Titanium Alloy Ti-6Al-4V / C. Anandan, L. Mohan // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – Vol. 25. – P. 4416-4424.
10. Effect of the content of B₄C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V / L. L. Bai, J. Li, J. L. Chen, J. Z. Shao, C. C. Qu // *Optics and Laser Technology*. – 2016. – Vol. 76. – P. 33-45.
11. Jin, J. The influence of plasma nitriding on microstructure and properties of CrN and CrNiN coatings on Ti6Al4V by magnetron sputtering / J. Jin, H. Duan, X. Li // *Vacuum*. – 2017. – Vol. 136. – P. 112-120.
12. Effects of annealing on tensile property and corrosion behavior of Ti-Al-Zr alloy / Tae-Kyu Kim, Byung-Seon Choi, Yong-Hwan Jeong, Doo-Jeong Lee, Moon-Hee Chang // *Journal of Nuclear Materials*. – 2002. – Vol. 301. – P. 81-89.
13. Influence of ion implantation on nanoscale intermetallic – phase formation in Ti-Al, Ni-Al and Ni-Ti systems / I. A. Kurzina, E. V. Kozlov, Yu. P. Sharkeev, A. I. Ryabchikov, I. B. Stepanov, I. A. Bozhko, M. P. Kalashnikov, D. O. Sivin, S. V. Fortuna // *Surf. Coat. Technology*. – 2007. – Vol. 201. – P. 8463-8468.
14. Leyens, C. Intermetallic Ti-Al coatings for protection of titanium alloys: oxidation and mechanical behavior / C. Leyens, M. Peters, W. A. Kaysser // *Surface and Coatings Technology*. – 1997. – Vol. 94-95. – P. 34.
15. Microstructure and properties of TiB₂-TiB reinforced titanium matrix composite coating by laser cladding / Y. Lin, J. Yao, Y. Lei, H. Fu, L. Wang // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2016. – Vol. 86. – P. 216-227.
16. Microstructure and high temperature oxidation resistance of in-situ synthesized TiN/Ti₃Al intermetallic composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding process / H. Liu, X. Zhang, Y. Jiang, R. Zhou // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 670. – P. 268-274.
17. High-temperature wear and oxidation behaviors of TiNi/Ti₂Ni matrix composite coatings with TaC addition prepared on Ti6Al4V by laser cladding / Y. H. Lv, J. Li, Y. F. Tao, L. F. Hu // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 402. – P. 478-494.
18. Influence of SiC-Ti/Al on the Microstructural and Mechanical Properties of Deposited Ti-6V-4Al Alloy with Cold Spray Technique / K. E. Machethe, A. P. I. Popoola, D. I. Adebisi, O. S. I. Fayomi // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 7. – P. 549-555.
19. PalDey, S. Cathodic arc deposited thin film coatings based on TiAl intermetallics / S. PalDey, S. C. Deevi, T. L. Alford // *Intermetallics*. – 2004. – Vol. 12. – Iss. 7-9. – P. 985-999.
20. Fretting Fatigue in Aircraft Components Made of Ti-Al-V Alloys / M. Sujata, M. Madan, K. Raghavendra, S. K. Bhaumik // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 55. – P. 481-486.
21. Antimicrobial property, cytocompatibility and corrosion resistance of Zn-doped ZrO₂/TiO₂ coatings on Ti6Al4V implants / R. Wang, X. He, Y. Gao, X. Yao, B. Tang // *Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 75. – P. 7-15.