



Модифицирование поверхности, в том числе пучками
заряженных частиц, потоками фотонов и плазмы
Modification of Surface Including Charged Particle Beams
and Photon and Plasma Fluxes



УДК 621.793.184

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-45-52>

Научная статья

Research article



Влияние температуры ионно-плазменной обработки алюминиевого покрытия на микроструктуру и фазовый состав титанового сплава ВТ6

А. А. Николаев[✉], А. Ю. Назаров, Э. Л. Варданян, В. Р. МухамадеевУфимский университет науки и технологий
Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32[✉] alex.nkv8@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния температуры обработки поверхности алюминиевого покрытия на титановом сплаве ВТ6 в плазме дугового разряда низкого давления на микроструктурные и фазовые изменения. Ионно-плазменную обработку проводили в плазме дугового разряда низкого давления при температурах 450 и 500 °С в среде аргона. Алюминий наносили вакуумно-дуговым методом, толщина покрытия составляла ~3 мкм. Микроструктурные изменения исследовали с помощью растровой электронной микроскопии. Структурно-фазовый состав определяли по результатам расшифровки дифрактограмм, полученных при симметричной съемке в CuK_α -излучении. Показано, что после нанесения алюминиевого покрытия в результате нагрева при ионной очистке формируется приповерхностный α -стабилизированный слой толщиной до 2,5 мкм. Последующая ионно-плазменная обработка приводит к формированию интерметаллидной области TiAl_3 толщиной до 1,5 мкм, α -стабилизированная область увеличивается до 5,5 мкм. Выявлено, что повышение температуры обработки приводит как к увеличению толщины указанных выше областей, так и к появлению промежуточной интерметаллидной зоны TiAl .

Ключевые слова: ионно-плазменная обработка, интерметаллидные покрытия, градиентные покрытия, титановые сплавы

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 22-29-01463, <https://rscf.ru/project/22-29-01463/>.

Для цитирования: Николаев А.А., Назаров А.Ю., Варданян Э.Л., Мухамадеев В.Р. Влияние температуры ионно-плазменной обработки алюминиевого покрытия на микроструктуру и фазовый состав титанового сплава ВТ6. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(2):45–52. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-45-52>

Effects of ion-plasma treatment temperature of the aluminium coating on the structure and phase composition of the VT6 titanium alloy

A. A. Nikolaev[✉], A. Yu. Nazarov, E. L. Vardanyan, V. R. MukhamadeevUfa University of Science and Technology
32 Zaki Validi Str., Ufa 450076, Russia[✉] alex.nkv8@gmail.com

Abstract. In this study, we studied the effects of aluminum coating treatment temperature on the microstructure and phase composition when applied to a VT6 titanium alloy substrate within a low-pressure arc discharge plasma environment. The ion-plasma treatment was conducted at 450 and 500 °C, employing argon shielding, while the aluminum coating was deposited using the vacuum-arc process,

resulting in a coating thickness of $\sim 3 \mu\text{m}$. Microstructural analysis was performed using a scanning electron microscope, and the structural and phase composition were examined using X -ray diffraction (XRD) imaging in symmetric imaging mode with CuK_α radiation. Our findings demonstrate that the application of the aluminum coating initiates the formation of a near-surface α -stabilized layer, extending up to $2.5 \mu\text{m}$ in thickness due to the heat generated during the ion cleaning process. Subsequent ion-plasma treatment further results in the development of a TiAl_3 intermetallic site, reaching thicknesses of up to $1.5 \mu\text{m}$, while the α -stabilized region expands to $5.5 \mu\text{m}$. Higher temperatures during the treatment process contribute to an increase in the thickness of these aforementioned layers and also lead to the emergence of an intermediate TiAl intermetallic layer.

Keywords: ion-plasma treatment, intermetallic coatings, gradient coatings, titanium alloys

Acknowledgements: This research received support from the Russian Science Foundation under Grant No. 22-29-01463, <https://rscf.ru/project/22-29-01463/>.

For citation: Nikolaev A.A., Nazarov A.Yu., Vardanyan E.L., Mukhamadeev V.R. Effects of ion-plasma treatment temperature of the aluminium coating on the structure and phase composition of the VT6 titanium alloy. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(2):45–52. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-45-52>

Введение

Титан и его сплавы широко применяются в авиационной промышленности и медицине [1–3]. Однако их износостойкость находится на низком уровне. В большинстве пар трения с титаном происходят диффузионное взаимодействие поверхностей и их изнашивание [4; 5]. В связи с этим разработка и совершенствование новых методов повышения износостойкости титановых сплавов являются актуальной задачей.

Одними из эффективных способов повышения износостойкости являются модификация поверхностных слоев путем ионного азотирования [6–8] и легирования [9; 10], а также нанесение покрытий [11–13]. В случае титановых сплавов ионное азотирование необходимо проводить при высоких температурах и длительных выдержках [14; 15], а низкотемпературная вариация этого процесса [16; 17] не очень эффективна. Нанесение покрытий позволяет получать сверхтвердые пленки на поверхностях на основе нитридов, карбидов и оксидов переходных металлов [18–20], однако при ударных нагрузках происходит их отслоение [21; 22], что неизбежно приводит к ускоренному износу поверхности изделия, в том числе частицами разрушенного покрытия.

Перспективным направлением в области упрочнения поверхности изделий конструкционного назначения является создание градиентных покрытий из сплавов, которые обладают большей ударопрочностью и стойкостью к агрессивным средам в связи с отсутствием резкой границы основа–покрытие. Для стальных изделий такая проблема решается за счет комбинации азотирования и нанесения покрытий (Duplex Treatment) [23; 24]. Однако для титановых сплавов эта технология не приводит к повышению эксплуатационных свойств ввиду значительно меньших твердости и глубины азотированного слоя при одинаковых времени и температурах обработки.

Титан при взаимодействии со многими металлами образует интерметаллические соединения,

которые в большинстве случаев обладают повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами по сравнению с чистым титаном и его сплавами без упрочнения. Интерметаллиды системы Ti-Al имеют малый удельный вес ($3,3\text{--}4,2 \text{ г/см}^3$) и отличаются высокими твердостью, жаропрочностью, стойкостью к окислению и коррозии, что делает их перспективными для применения в авиационной промышленности [25]. Однако ввиду своей высокой хрупкости, особенно фазы TiAl_3 , их применение в качестве объемных материалов не рационально. Работы [26–28] были посвящены получению и изучению покрытий и поверхностных слоев на основе данных интерметаллидов. Результаты исследований показали повышение как прочностных характеристик до 20 %, так и износостойкости на несколько порядков при толщине покрытия менее 16 мкм.

На данный момент основными технологиями получения интерметаллидных покрытий системы Ti-Al являются: алитирование титана [29], магнетронное [30] и вакуумно-дуговое [31] напыления, лазерная [32] и электронно-лучевая [33] наплавки, ионная имплантация [34], а также комбинации этих методов с последующей термообработкой [35–37]. Однако в случае осаждения покрытий и ионной имплантации трудно контролировать фазовый состав получаемых слоев. При предварительном осаждении алюминия и/или Ti-Al -покрытия с последующей термообработкой при температурах старения титановых сплавов покрытие состоит только из фазы TiAl_3 . Применение последующей ионно-плазменной обработки может интенсифицировать процесс образования интерметаллидов TiAl и Ti_3Al , которые по сравнению с фазой TiAl_3 обладают большей пластичностью.

В настоящем исследовании рассматривается технология, основанная на комбинации вакуумно-дугового осаждения покрытия из чистого алюминия и его последующей обработки в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления. Цель данной работы – изучить влияние температуры ионно-

плазменной обработки алюминиевого покрытия на структурно-фазовые изменения поверхностных слоев титанового сплава ВТ6.

Методика исследований

Образцы в форме дисков диаметром 20 мм и толщиной 4 мм были изготовлены из титанового прутка (сплав ВТ6). Комбинированная обработка проводилась в 2 этапа. На первом – методом вакуумно-дугового осаждения на поверхность титанового диска наносилось покрытие из чистого алюминия толщиной ~3 мкм. Предварительно проводилась ионная очистка поверхности образцов в аргоновой плазме при токе разряда 40 А и напряжении смещения 800 В в течение 30 мин до достижения температуры поверхности 450 °С, затем в течение 1 мин – в алюминиевой плазме при токе дугового испарителя 60 А. Температура поверхности измерялась с помощью хромель-капельной термопары и инфракрасного пирометра AST250+ («Accurate Sensors Technologies», Индия). На втором этапе проводилась обработка в газовой плазме, гене-

рируемой плазменным источником с накаливаемым катодом ПИНК (ИСЭ СО РАН, Россия) [38], в течение 1 ч в среде аргона. Напряжение смещения задавалось в зависимости от температуры обработки, ток разряда оставался постоянным и составлял 50 А. Обработка происходила при температурах 450 и 500 °С. Затем образцы охлаждались в вакууме в среде аргона при давлении 1 Па.

Исследование структуры поперечных шлифов образцов после обработки осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа Mira («Tescan», Чехия) в режиме вторичных электронов. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре Ultima IV («Rigaku», Япония) в CuK_α -излучении при симметричной съемке.

Результаты и их обсуждение

Для определения характера взаимодействия алюминиевого покрытия и титановой подложки из сплава ВТ6 было проведено исследование влияния температуры ионно-плазменной обработки на изме-

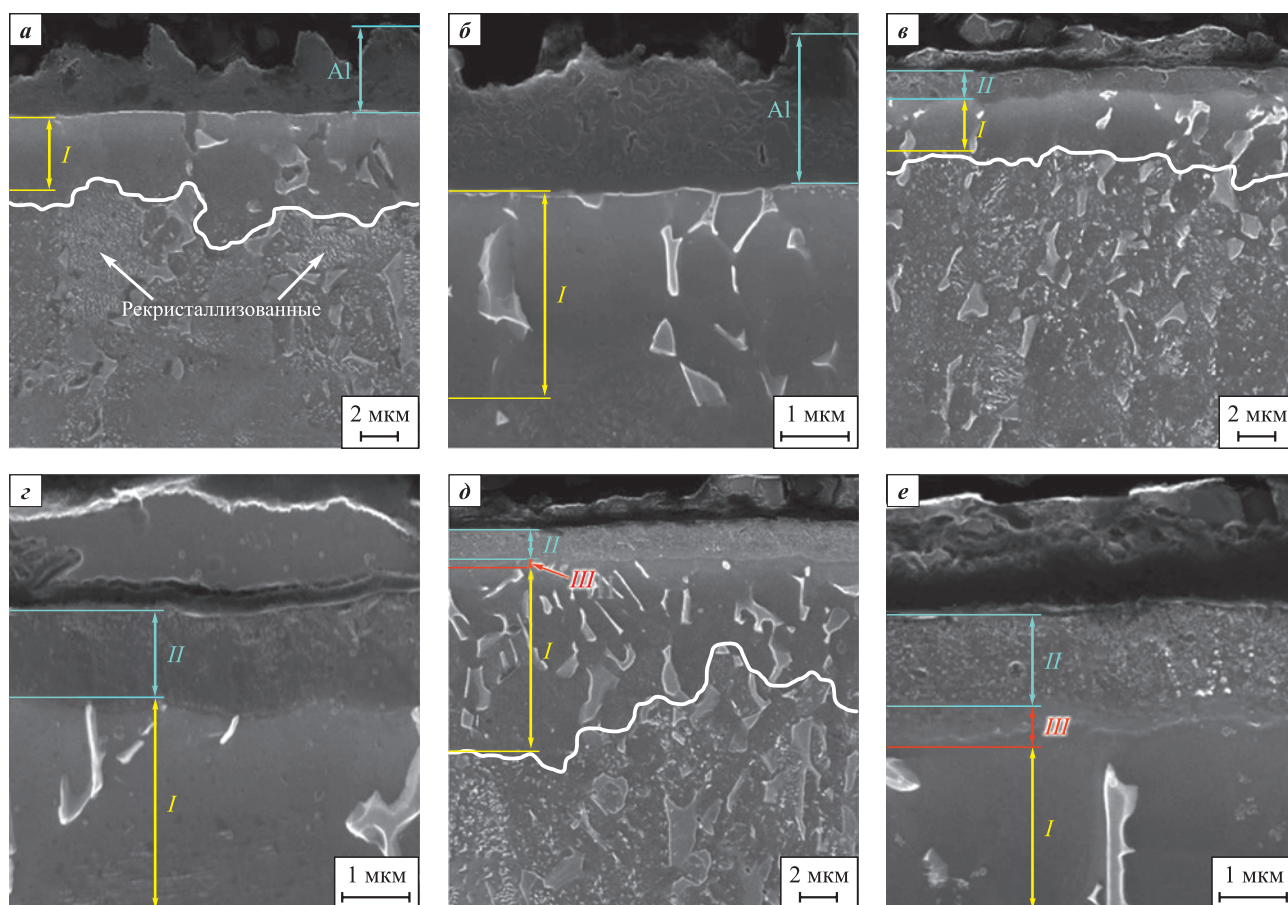


Рис. 1. Изображения структуры поперечного сечения образцов титана с покрытием из алюминия
а, б – исходное покрытие; в–е – после ионно-плазменной обработки при 450 (в, з) и 500 °С (д, е)

Fig. 1. Polished section structures of the aluminum-coated titanium samples
а, б – initial coating; в–е – after ion-plasma treatment at 450 (в, з) and 500 °С (д, е)

нение структуры и фазовый состав поверхностных слоев. После осаждения алюминиевого покрытия на исходную шероховатую поверхность (рис. 1, а, б) в приповерхностном слое подложки формируется α -стабилизированная область I глубиной порядка $2,5 \pm 0,5$ мкм. Она возникает в результате диффузии элементов покрытия в начальный момент осаждения, когда поверхность титанового сплава после ионной очистки все еще нагрета до температур 450–470 °С. Отличить α -стабилизированную область от основы можно по растворению мелких рекристаллизованных β -частиц внутри α -зерен в результате диффузии алюминия вглубь поверхности и стабилизации α -фазы, поскольку Al является α -стабилизирующим элементом.

В результате ионно-плазменной обработки при 450 °С (рис. 1, в, г) помимо участка ионного воздействия сформировалась интерметаллидная область, состоящая из фазы TiAl_3 с высоким содержанием алюминия. Суммарная протяженность области

модификации увеличилась до $5 \pm 0,5$ мкм. Толщина исходного алюминиевого покрытия уменьшилась до ~2 мкм в результате травления плазмой. Само покрытие стало хрупким, о чем свидетельствует его разрушение в результате подготовки шлифов. По всей видимости, это связано с хрупкой интерметаллидной фазой TiAl_3 и ее большой объемной концентрацией в поверхностных слоях. Повышение температуры обработки до 500 °С привело к появлению переходной области между основой и зоной III (рис. 1, д, е). Исходя из анализа литературных данных [35; 36] она состоит из интерметаллида TiAl , выше нее, согласно градиенту концентрации алюминия, находится область, состоящая преимущественно из фазы TiAl_3 , а ниже – Ti_3Al .

Данное предположение подтверждается результатами рентгенофазового анализа, которые приведены на рис. 2. Фазовый состав поверхностных слоев при температуре обработки 450 °С представлен преимущественно интерметаллидом TiAl_3 . Пики алюминия

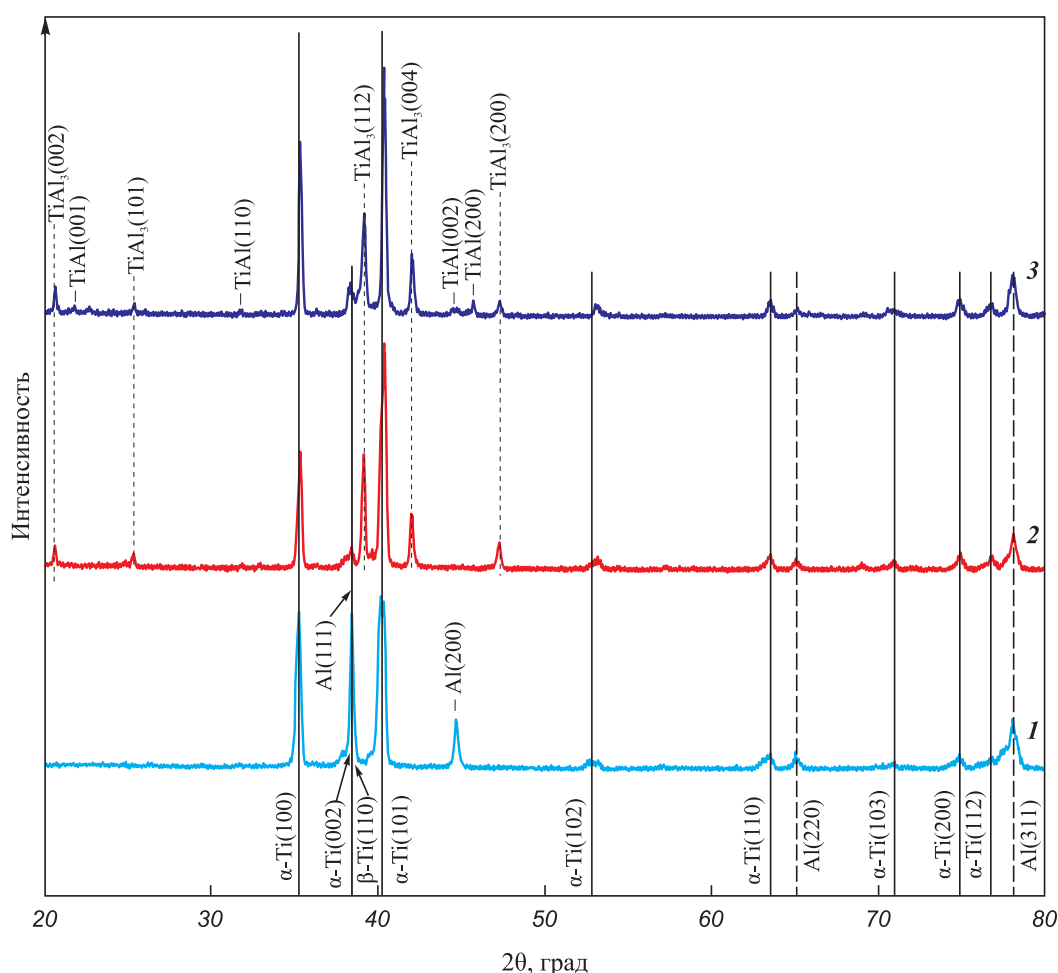


Рис. 2. Дифрактограммы исследуемых образцов

1 – исходное покрытие; 2 и 3 – после ионно-плазменной обработки при 450 (2) и 500 °С (3)

Fig. 2. XRD images of the samples

1 – initial coating; 2 and 3 – after ion-plasma treatment at 450 (2) and 500 °С (3)

не были обнаружены, вероятно ввиду их малой концентрации в поверхностном слое покрытия. Помимо интерметаллидов происходит образование твердого раствора замещения алюминия в титане, о чем свидетельствует смещение пиков титана в область больших углов дифракции, характеризующее уменьшение периода решетки. При увеличении температуры обработки до 500 °C в составе поверхностных слоев выявлен интерметаллид TiAl, а пики Ti₃Al не обнаружены. При этом увеличиваются интенсивность и количество пиков от фазы TiAl₃, что коррелирует с микроструктурными изменениями.

Ввиду хрупкости полученных покрытий в дальнейших работах планируется исследовать влияние времени ионно-плазменной обработки и толщины исходного алюминиевого покрытия на элементный и фазовый составы получаемых слоев и их износостойкость.

Заключение

Представлены результаты экспериментов по получению интерметаллидных поверхностных слоев путем осаждения алюминиевого покрытия на поверхность титановой подложки с последующей обработкой в газовой плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления.

Показано, что в результате такой обработки в поверхностном слое титанового сплава ВТ6 образуются интерметаллидный и α -стабилизированный слои. При температуре обработки 450 °C интерметаллидный слой представлен только фазой TiAl₃ толщиной до 1,5 мкм. Увеличение температуры обработки до 500 °C приводит к образованию дополнительно слоя интерметаллида TiAl толщиной 300 нм, который располагается под слоем TiAl₃ толщиной 1,8 мкм. Рефлексы от интерметаллида Ti₃Al на дифрактограммах не обнаружены.

Формирование α -стабилизированного слоя происходит уже при осаждении алюминиевого покрытия. С ростом температуры ионно-плазменной обработки увеличивается толщина данного слоя, что обусловлено ростом скорости диффузии алюминия в титановую подложку.

Список литературы / References

1. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012;5:8–14.
Pavlova T.V., Kashapov O.S., Nochovnaya N.A. Titanium alloys for gas turbine engines. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*. 2012;5:8–14. (In Russ.).
2. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и пер-

спективные направления их развития. *Труды ВИАМ*. 2013;2:4.

Horev A.I. Fundamental and applied work on structural titanium alloys and promising areas of their development. *Trudy VIAM*. 2013;2:4. (In Russ.).

3. Pawlak W., Kubiak K.J., Wendler B.G., Mathia T.G. Wear resistant multilayer nanocomposite WC_{1-x}/C coating on Ti–6Al–4V titanium alloy. *Tribology International*. 2015;82(B):400–406.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.05.030>

4. Bansal D.G., Eryilmaz O.L., Blau P.J. Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti–6Al–4V alloy. *Wear*. 2011;271(9–10):2006–2015.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.021>

5. Xing Y.Z., Wang G., Zhang Y., Chen Y.N., Dargusch M. Development in plasma surface diffusion techniques of Ti–6Al–4V alloy: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92(5):1901–1912. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0302-5>

6. Ахмадеев Ю.Х., Гончаренко И.М., Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Азотирование технически чистого титана в тлеющем разряде с полым катодом. *Письма в журнал технической физики*. 2005;31(13):24–30.

Ahmadeev Yu.Kh, Goncharenko I.M., Ivanov Yu.F., Koval' N.N., Shchanin P.M. Nitriding of commercially pure titanium in a glow discharge with a hollow cathode. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2005;31(13):24–30. (In Russ.).

7. Коваль Н.Н., Щанин П.М., Ахмадеев Ю.Х., Лопатин И.В., Колобов Ю.Р., Вершинин Д.С., Смолякова М.Ю. Влияние состава плазмообразующего газа на процесс азотирования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большого размера. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2012;(2):62–67.

Koval' N.N., Shchanin P.M., Akhmadeev Yu.Kh., Lopatin I.V., Kolobov Yu.R., Vershinin D.S., Smolyakova M.Yu. Influence of the composition of the plasma-forming gas on the nitriding process in a non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya*. 2012;(2):62–67. (In Russ.).

8. Денисов В.В., Ахмадеев Ю.Х., Денисова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Островерхов Е.В., Щанин П.М. Азотирование титана ВТ1-0 в постоянном и импульсном режимах горения несамостоятельного тлеющего разряда с титановым полым катодом. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2017;60(10-2):44–48.

Denisov V.V., Akhmadeev Yu.Kh., Denisova Yu.A., Ivanov Yu.F., Koval' N.N., Ostroverkhov E.V., Shchanin P.M. Nitriding of titanium VT1-0 in constant and pulsed modes of combustion of a non-self-sustained glow discharge with a titanium hollow cathode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2017; 60(10-2):44–48. (In Russ.).

9. Ryabchikov A.I., Sivin D.O., Bozhko I.A., Stepanov I.B., Shevelev A.E. Microstructure of titanium alloy modified

- by high-intensity implantation of low-and high-energy aluminium ions. *Surface and Coatings Technology*. 2020; 391: 125722. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125722>
10. Mikhailov V.V., Gitlevich A.E., Verkhuturov A.D., Mikhailyuk A.I., Belyakov A.V., Konevtsov L.A. Electrospark alloying of titanium and its alloys: The physical, technological, and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013;49(5):373–395. <https://doi.org/10.3103/S1068375513050074>
 11. Mamaeva A., Kenzhegulov A., Panichkin A., Alibekov Z., Wieleba W. Effect of magnetron sputtering deposition conditions on the mechanical and tribological properties of wear-resistant titanium carbonitride coatings. *Coatings*. 2022;12(2):193. <https://doi.org/10.3390/coatings12020193>
 12. Walczak M., Pasierbiewicz K., Szala M. Adhesion and mechanical properties of TiAlN and AlTiN magnetron sputtered coatings deposited on the DMSL titanium alloy substrate. *Acta Physica Polonica: A*. 2019;136(2):294–298. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.136.294>
 13. Ленивцева О.Г., Батаев И.А., Голковский М.Г., Самойленко В.В., Доставалов Р.А. Получение износостойких покрытий на титановых сплавах методом вневакуумной электронно-лучевой обработки. *Обработка металлов: Технология, оборудование, инструменты*. 2013;3(60):103–109.

 Lenivceva O.G., Bataev I.A., Golkovskiy M.G., Samoylenko V.V., Dostavalov R.A. Obtaining wear-resistant coatings on titanium alloys by non-vacuum electron beam processing. *Obrabotka metallov: Tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2013;3(60):103–109. (In Russ.).
 14. Рамазанов К.Н., Хайруллина И.З., Ковалевич А.А. Формирование защитно-упрочняющих покрытий на поверхности титановых сплавов методом ионного азотирования. *Вестник СГТУ*. 2011;2(1(53)):96–101.

 Ramazanov K.N., Khayrullina I.Z., Kovalevich A.A. Formation of protective and hardening coatings on the surface of titanium alloys by ion nitriding. *Vestnik SGTU*. 2011;2(1(53)):96–101. (In Russ.).
 15. Белоус В.А., Носов Г.И., Клименко И.О. Упрочнение титановых сплавов ионно-плазменным азотированием. *Вопросы атомной науки и техники*. 2017;5(111):75–82.

 Belous V.A., Nosov G.I., Klimenko I.O. Hardening of titanium alloys by ion-plasma nitriding. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. 2017;5(111):75–82. (In Russ.).
 16. Вершинин Д.С., Смолякова М.Ю. Низкотемпературное азотирование титана в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления. *Физика и химия обработки материалов*. 2011;5(5):15–20.

 Vershinin D.S., Smolyakova M.Yu. Low-temperature nitriding of titanium in the plasma of a low-pressure non-self-sustained arc discharge. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2011;5(5):15–20. (In Russ.).
 17. Farokhzadeh K., Edrisy A., Pigott G., Lidster P. Scratch resistance analysis of plasma-nitrided Ti–6Al–4V alloy. *Wear*. 2013;302(1-2):845–853. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.070>
 18. Vardanyan E.L., Ramazanov K.N., Nagimov R.S., Nazarov A.Y. Properties of intermetallic TiAl based coatings deposited on ultrafine grained martensitic steel. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125657. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125657>
 19. Vereschaka A., Tabakov V., Grigoriev S., Sitnikov N., Milovich F., Andreev N., Bublikov J. Investigation of wear mechanisms for the rake face of a cutting tool with a multilayer composite nanostructured Cr–CrN–(Ti, Cr, Al, Si) N coating in high-speed steel turning. *Wear*. 2019; 438:203069. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203069>
 20. Погребняк А.Д., Кравченко Я.О., Бондар О.В., Жоллыбеков Б., Купчишин А.И. Структурные особенности и трибологические свойства многослойных покрытий на основе тугоплавких металлов. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2018;54(2):152–172.

 Pogrebnyak A.D., Kravchenko Ya.O., Bondar O.V., Zhollybekov B., Kupchishin A.I. Structural features and tribological properties of multilayer coatings based on refractory metals. *Fizikokhimiya poverhnosti i zashchita materialov*. 2018;54(2):152–172. (In Russ.).
 21. Zhang H., Li Z., He W., Ma C., Liao B., Li Y. Mechanical modification and damage mechanism evolution of TiN films subjected to cyclic nano-impact by adjusting N/Ti ratios. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;809: 151816. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151816>
 22. Krella A.K. Degradation of protective PVD coatings. In: *Handbook of materials failure analysis with case studies from the chemicals, concrete and power industries*. Butterworth-Heinemann, 2016. P. 411–440. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100116-5.00016-8>
 23. Gronostajski Z., Kaszuba M., Widomski P., Smolik J., Ziembra J., Hawryluk M. Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition. *Wear*. 2019;420:269–280. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.003>
 24. Гренадёр А.С., Соловьёв А.А., Оскомов К.В. Воздействие дуплексной обработки на механические свойства нержавеющей стали марки 316L. *Письма в Журнал технической физики*. 2020;46(21):14–17.

 Grenadyorov A.S., Solovyev A.A., Oskomov K.V. The effect of duplex processing on the mechanical properties of grade 316L stainless steel. *Technical Physics Letters*. 2020;46(11):1060–1063. <https://doi.org/10.1134/S106378502011005X>
 25. Lazurenko D.V., Bataev I.A., Laptev I.S., Ruktuev A.A., Maliutina I.N., Golkovsky M.G., Bataev A.A. Formation of Ti–Al intermetallics on a surface of titanium by non-vacuum electron beam treatment. *Materials Characterization*. 2017;134: 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.10.024>
 26. Zhang Y.B., Li H.X., Zhang K. Investigation of the laser melting deposited TiAl intermetallic alloy on titanium alloy. *Advanced Materials Research*. 2011;146:1638–1641. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.146-147.1638>

27. Liu Y., Wang D., Deng C., Huo L., Wang L., Fang R. Novel method to fabricate Ti–Al intermetallic compound coatings on Ti–6Al–4V alloy by combined ultrasonic impact treatment and electrospark deposition. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;628:208–212.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.144>
28. Parlikar C., Alam M.Z., Das D.K. Effect of Al₃Ti diffusion aluminide coating on tensile properties of a near α -Ti alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;530: 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.021>
29. Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю. Структура покрытий при жидкофазном алитировании титана. *Технология металлов*. 2021;(9):22–26.
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-9-22-26>
Kovtunov A.I., Khohlov Yu.Yu. The structure of coatings in the liquid-phase aluminizing of titanium. *Tekhnologiya metallov*. 2021;(9):22–26. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-9-22-26>
30. Bauer P.P., Laska N., Swadźba R. Increasing the oxidation resistance of γ -TiAl by applying a magnetron sputtered aluminum and silicon based coating. *Intermetallics*. 2021;133:107177.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107177>
31. Zhang M., Shen M., Xin L., Ding X., Zhu, S., Wang F. High vacuum arc ion plating TiAl coatings for protecting titanium alloy against oxidation at medium high temperatures. *Corrosion Science*. 2016;112:36–43.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.07.005>
32. Малютина Ю.Н., Си-Моханд Х. Улучшение триботехнических характеристик титана путем лазерной наплавки порошка γ -TiAl. В сб.: *Электротехника. Энергетика. Машиностроение: Сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых* (г. Новосибирск, 02–06 декабря 2014 г.). Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. Ч. 3. С. 227–230.
33. Батаев И.А., Лазуренко Д.В., Голковский М.Г., Лаптев И.С., Чакин И.К., Иванчик И.С. Поверхностное легирование титана алюминием с использованием метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей. *Обработка металлов: Технология, оборудование, инструменты*. 2017;(1(74)):51–60.
Bataev I.A., Lazurenko D.V., Golkovskiy M.G., Laptev I.S., Chakin I.K., Ivanchik I.S. Surface alloying of titanium with aluminum using the method of non-vacuum electron-beam surfacing of powder mixtures. *Obrabotka metallov: Tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2017;(1(74)):51–60. (In Russ.).
34. Nikonenko A.V., Popova N.A., Nikonenko E.L., Kallashnikov M.P., Oks E.M., Kurzina I.A. Influence of the aluminum ion implantation dose on the phase composition of submicrocrystalline titanium. *Vacuum*. 2021;189:110230.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110230>
35. Ramos A.S., Calinas R., Vieira M.T. The formation of γ -TiAl from Ti/Al multilayers with different periods. *Surface and Coatings Technology*. 2006;200(22-23):6196–6200.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.023>
36. Garbacz H., Pouquet J.M., García-Lecina E., Díaz-Fuentes M., Wieceński P., Martín R.H., Wierchoń T., Kurzydowski K.J. Microstructure, fatigue and corrosion properties of the Ti–Al intermetallic layers. *Surface and Coatings Technology*. 2011;205(19):4433–4440.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.03.072>
37. Romankov S.E., Mukashev B.N., Ermakov E.L., Muhamedshina D.N. Structural formation of aluminide phases on titanium substrate. *Surface and Coatings Technology*. 2004;180:280–285.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.070>
38. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Лопатин И.В., Ахмадев Ю.Х., Шугуров В.В., Крысина О.В., Денисов В.В. Генерация низкотемпературной газоразрядной плазмы в больших вакуумных объемах для плазмохимических процессов. *Российский химический журнал*. 2013;57(3-4):121–133.
Koval' N.N., Ivanov Yu.F., Lopatin I.V., Akhmadev Yu.Kh., Shugurov V.V., Krysin O.V., Denisov V.V. Generation of low-temperature gas-discharge plasma in large vacuum volumes for plasma-chemical processes. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2013;57(3-4):121–133. (In Russ.).

Сведения об авторах

Алексей Александрович Николаев – аспирант кафедры технологии машиностроения, Уфимский университет науки и технологий (УУНИТ)

 **ORCID:** 0000-0002-2584-4790

 **E-mail:** alex.nkv8@gmail.com

Алмаз Юнирович Назаров – к.т.н., старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, УУНИТ

 **ORCID:** 0000-0002-4711-4721

 **E-mail:** nazarov_almaz15@mail.ru

Эдуард Леонидович Варданян – д.т.н.

 **ORCID:** 0000-0001-7047-6459

Венер Рифкатович Мухаммадеев – старший преподаватель кафедры механики и цифрового проектирования, УУНИТ

 **ORCID:** 0000-0002-2018-4877

 **E-mail:** vener_muhamadeev@mail.ru

Information about the Authors

Alexey A. Nikolaev – Postgraduate Student, Department of Manufacturing Technology, Ufa University of Science and Technology

 **ORCID:** 0000-0002-2584-4790

 **E-mail:** alex.nkv8@gmail.com

Almaz Yu. Nazarov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Manufacturing Technology, Ufa University of Science and Technology

 **ORCID:** 0000-0002-4711-4721

 **E-mail:** nazarov_almaz15@mail.ru

Eduard L. Vardanyan – Dr. Sci. (Eng.)

 **ORCID:** 0000-0001-7047-6459

Vener R. Mukhamadeev – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering and CAD, Ufa University of Science and Technology

 **ORCID:** 0000-0002-2018-4877

 **E-mail:** vener_muhamadeev@mail.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

А. А. Николаев – формирование основной концепции, подготовка текста, формулировка выводов.

А. Ю. Назаров – проведение испытаний образцов, подготовка текста статьи, корректировка текста, корректировка выводов.

Э. Л. Варданян – постановка цели и задачи исследования, научное руководство.

В. Р. Мухамадеев – подготовка эксперимента, руководство проведением эксперимента, обеспечение ресурсами.

A. A. Nikolaev – conceptualization, paper authoring, conclusions.

A. Yu. Nazarov – testing, paper authoring, paper proofreading, conclusion review.

E. L. Vardanyan – problem formulation, overall supervision.

V. R. Mukhamadeev – test preparation, testing, provision of equipment.

Статья поступила 30.12.2022 г.

Доработана 29.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Received 30.12.2022

Revised 29.05.2023

Accepted 31.05.2023