

УДК 538.951

1.3.8 – Физика конденсированного состояния (технические, физико-математические науки)

Исследования процессов азотирования сплава титана ВТ6

И. В. Федотова, Н. А. Орлова, Р. М. Закирова, П. Н. Крылов, В. Ф. Кобзиев, В. А. Приходько

Удмуртский государственный университет, Россия, 426034, Ижевск, ул. Университетская, 1

Аннотация. Образцы сплава титана ВТ6 подвергнуты ионно-плазменному азотированию и азотированию посредством нанесения плёнок нитрида титана с последующей ионно-лучевой обработкой ионами аргона и азота. Рентгенофазовый анализ образцов ВТ6 после ионно-плазменного азотирования показал наличие нитридов титана. Азотирование посредством нанесения плёнок нитрида титана и ионно-лучевой обработки приводит к образованию на поверхности фаз нитрида титана, оксинитрида титана и алюмонитрида титана. В результате ионно-плазменного азотирования микротвёрдость образцов увеличилась в 3 раза. Азотирование посредством нанесения плёнок нитрида титана и ионно-лучевой обработки приводит к увеличению микротвёрдости в 5 раз.

Ключевые слова: сплав ВТ6, ионно-плазменное азотирование, плёнки нитрида титана, реактивное ВЧ магнетронное напыление, ионно-лучевая обработка.

✉ Раушания Закирова, e-mail: ies@udsu.ru

Study of nitriding processes of VT6 titanium alloy

I. V. Fedotova, N. A. Orlova, R. M. Zakirova, P. N. Krylov, V. F. Kobziev, V. A. Prikhodko

Udmurt State University (1, Universitetskaya St., Izhevsk, 426034, Russian Federation)

Summary. Ion-plasma nitriding of grade 5 titanium alloy was performed on a modernized UVN71-P3 unit, and by applying titanium nitride films followed by ion-beam treatment in an argon-nitrogen gas mixture on a modernized URM 3.279.029 unit. After ion-plasma nitriding as well as after applying thin films followed by ion-beam treatment, all samples of grade 5 titanium alloy had a characteristic golden hue. After ion-plasma nitriding, the X-ray phase analysis of the grade 5 titanium alloy samples showed the presence of $\text{TiN}_{0.26}$ and TiN . Nitriding by applying titanium nitride films followed by ion-beam treatment led to the formation of TiN , titanium oxynitride $\text{TiO}_{0.34}\text{N}_{0.74}$ and titanium aluminum nitride Ti_3AlN phases on the surface. The lattice parameters a of α -Ti decreased, which could be due to an increase in the concentration of aluminum in the surface layers caused by irradiation. In addition, –the subsequent ion-beam treatment led to the appearance of a perovskite-like phase of titanium aluminum nitride. Because of ion-plasma nitriding, the microhardness increased by 3 times. After nitriding by applying titanium nitride films followed by ion-beam treatment, microhardness increased by 5 times. The abrasion rate decreased by 5 times after nitriding by applying titanium nitride films followed by ion-beam treatment, and after ion-plasma nitriding - by 4 times. Ion-beam treatment caused the formation of a small diffusion layer at the film-substrate interface. The reason for the formation of the layer could be the so-called "long-range effect".

Keywords: grade 5 titanium alloy, ion-plasma nitriding, titanium nitride films, reactive RF magnetron sputtering, ion-beam treatment.

✉ Raushaniya M. Zakirova, e-mail: ies@udsu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Титан и его сплавы перспективны для применения во многих областях, из них изготавливают широкую номенклатуру деталей – диски, лопатки турбин, направляющие аппараты, обтекатели, трубопроводы, крепеж и т.д. [1]. Поскольку титан является очень активным металлом, то изделия из титана и титановых сплавов имеют свои недостатки. Согласно [2, 3], высокое сродство к кислороду и, по этой причине, наличие тонкой оксидной пленки препятствует адгезии поверхностью обычных смазочных материалов. Высокая реакционная способность поверхности обуславливает низкую нагрузку контактного схватывания при трении, высокие значения коэффициента трения и скорости износа [4–8].

Для снижения коэффициента трения, повышения антифрикционных свойств и микротвёрдости титана и его сплавов применяют различные поверхностные обработки, такие как оксидирование, альфирование, азотирование, цементация и т.д. [1].

Азотирование является одним из наиболее эффективных способов повышения твёрдости и износостойкости титана и его сплавов. Традиционное газовое азотирование титана обычно осуществляют при температурах 850–950 °С, когда в металле активно развиваются процессы термического разупрочнения, приводящие к существенному

снижению объёмной прочности рассматриваемого материала [9]. Однако высокая температура азотирования приводит к росту размера зерна и негативно сказывается на механических свойствах титановых сплавов [10, 11]. В этой связи важное практическое значение имеет разработка новых технологий азотирования, обеспечивающих ускоренное насыщение поверхности титана азотом при невысоких температурах азотирования, когда материал основы еще сохраняет значительную прочность [10].

В работе сравниваются процессы азотирования титана марки ВТ6 на модернизированной установке УВН71-ПЗ (метод ионно-плазменного азотирования) и на модернизированной установке УРМ 3.279.029 (метод на основе нанесения плёнок нитрида титана магнетронным напылением в газовой среде смеси аргона и азота и последующей ионно-лучевой обработки азотом).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Азотированию подвергались образцы титанового сплава ВТ6, представляющего собой $\alpha+\beta$ сплав и содержащий основные компоненты Ti 88.88 вес. %, Al 6.30 вес. % и V 4.80 вес. %, что соответствует ГОСТ 19807-91. Перед азотированием образцы шлифовали и полировали до зеркальной поверхности и промывали в спирте.

Ионно-плазменное азотирование проводили на модернизированной установке УВН71-ПЗ [12]. Азотирование проводили циклически в атмосфере азота. Время одного цикла составляло 8 часов. В каждом цикле перед проведением азотирования для удаления окисного слоя образцы дополнительно подвергались очистке ионами инертного газа (аргона) в течение 10 мин при температуре 500 °С, и при данной температуре далее проводили процедуру азотирования. Режимы азотирования были следующими: ток накала вольфрамовой нити катода 85 А, ток полого катода 40 А, напряжение полого катода 50 В, напряжение смещения 400 В, рабочее давление $3 \cdot 10^{-1}$ Па. После восьмичасового цикла производили разгерметизацию камеры и доставали часть образцов, производили замену нити накала катода и проводили следующий цикл азотирования. В результате были получены партии образцов со временем азотирования 8, 16, 24, 32 и 40 часов.

Нанесение плёнок нитрида титана и последующую ионно-лучевую обработку проводили на модернизированной установке УРМ 3.279.029 [13]. В качестве подложек использовали пластины из титанового сплава ВТ6 размером 10×20×10 мм. Для определения толщины плёнок и уточнение фазового состава применяли стеклянные подложки. Перед напылением плёнок подготовленные подложки подвергали ионной очистке в аргоне (ток ионной очистки 30 мА, время очистки 10 мин, температура 300 °С). Нанесение плёнок проводили в течение 2 ч в смеси аргона с азотом при следующих режимах: давление в камере соответствовало $3.2 \cdot 10^{-1}$ Па, напряжение магнетрона 560 В и ток 0.8 А (использовался режим стабилизации мощности разряда [14]), температура конденсации 300 °С. Концентрация азота в составе газовой среды (смесь аргона с азотом) в процессах нанесения составляла 2, 5, 10, 15 и 20 %. После нанесения плёнок образцы без разгерметизации камеры подвергались дополнительной обработке потоком смеси ионов аргона и азота (10 % N) в течение 10 мин (напряжение ионного источника 600 В, ток ионной обработки 30 мА). В результате были получены плёнки толщиной от 6.8 до 6.1 мкм (толщина плёнок уменьшалась с увеличением концентрации азота в газовой среде, что согласуется с работой [14]). Измерения толщины плёнок проводили на МИИ-4.

Рентгенофазовый анализ азотированных образцов выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6 в монокроматическом $\text{Co-K}\alpha$ излучении со средневзвешанной длиной волны 0.17902 нм ($U = 25$ кВ, $I = 25$ мА) в диапазоне брегговских углов $2\theta = 30\text{--}150^\circ$ методом съёмки по точкам с шагом 0.05° и временем набора импульсов в точке 5 с. Обработку дифрактограмм и расчёт параметров решётки осуществляли с помощью программного комплекса PDWin (ИЦ «Буревестник», Санкт-Петербург).

Микротвёрдость измеряли методом Виккерса на микротвёрдомере ПМТ-3 по стандартной методике ГОСТ 9450-76 (нагрузка, приложенная к алмазному индентору, составляла 50 г).

По ГОСТ 27674-88 износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Для измерения скорости изнашивания был изготовлен лабораторный стенд. Стенд состоял из столика с держателем образца и латунного диска. Диск с постоянной скоростью 8 об/мин (условия трения без смазки) и усилием вращения по поверхности испытываемых образцов. Величину износа определяли по средним значениям скоростей образования канавок, образовавшихся на образцах после истирания за определённые промежутки времени. Глубину канавок измеряли с помощью профилометра, времена истирания измеряли секундомером. Результаты испытаний рассматривали как относительную износостойкость.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Все образцы титана марки ВТ6 и после ионно-плазменного азотирования, и после нанесения тонких плёнок с последующей обработкой имели характерный золотистый оттенок.

Рентгенофазовый анализ исходного образца сплава ВТ6 показал, что основные дифракционные отражения соответствуют титану гексагональной модификации α -Ti (card № 44-1294) с параметрами решётки $a = 2.932 \text{ \AA}$, $c = 4.670 \text{ \AA}$.

В образцах, подвергнутых ионно-плазменному азотированию, обнаружены слабые рефлексы (рис. 1), которые можно приписать фазам $\text{TiN}_{0.26}$ (card № 44-1095) и TiN (card № 38-1420). Также на дифрактограммах азотированных образцов наблюдаются слабые рефлексы, принадлежащие титану кубической модификации β -Ti (card № 44-1288).

Параметры решётки α -Ti после ионно-плазменного азотирования уменьшились до (2.924 ± 0.001) и $(4.662 \pm 0.001) \text{ \AA}$, для a и c соответственно.

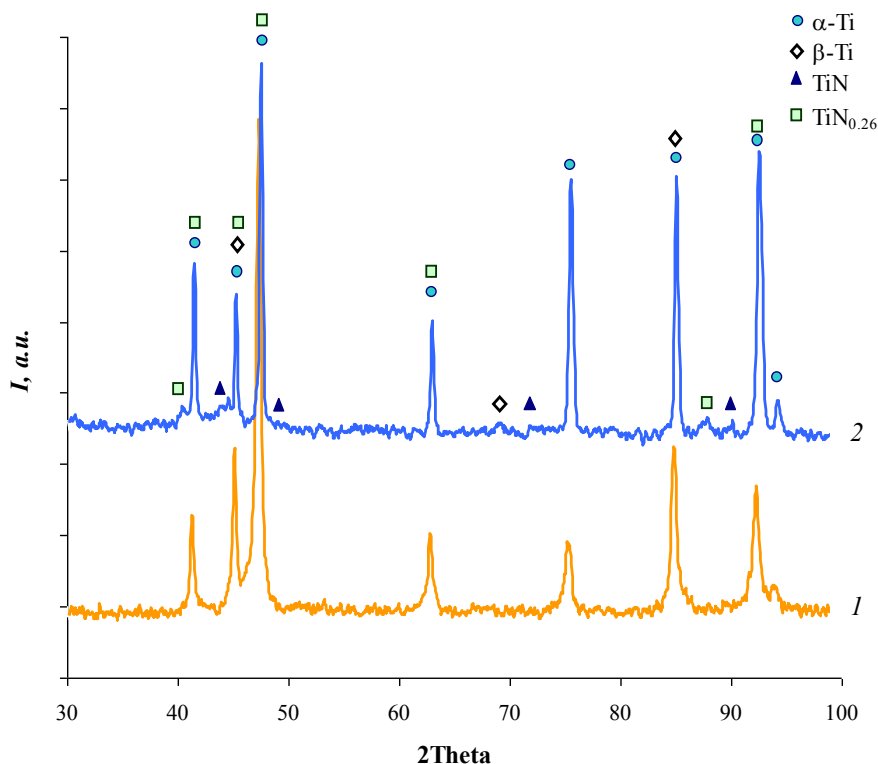


Рис. 1. Дифрактограммы образцов сплава ВТ6: 1 – до азотирования, 2 – после азотирования 40 ч

Fig. 1. Diffraction patterns of VT6 alloy samples: 1 – before nitriding, 2 – after nitriding for 40 h

Микротвёрдость образцов сплава ВТ6 в результате ионно-плазменного азотирования увеличилась приблизительно в 3 раза (рис. 2, *a*).

Трибологические исследования позволили оценить скорость истирания исследуемых образцов (рис. 2, *b*), которая уменьшилась в ~4 раза для азотированных образцов.

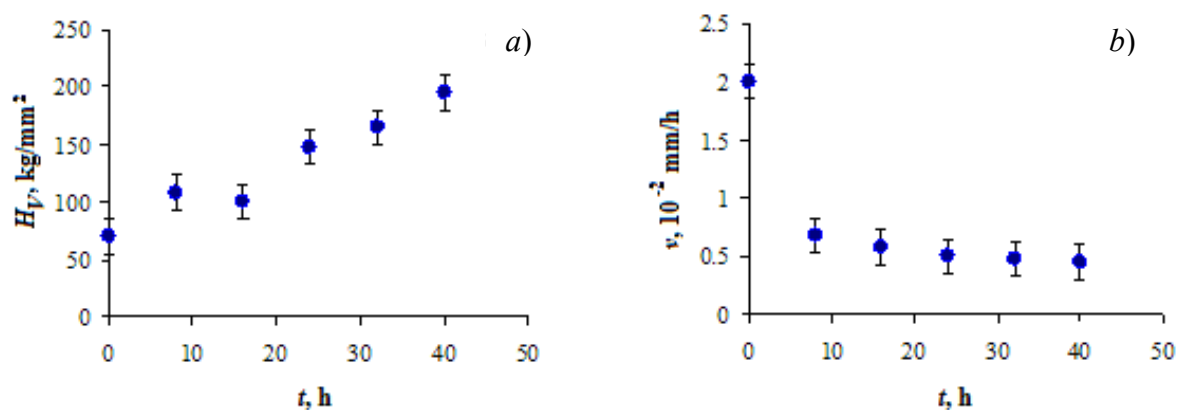


Рис. 2. Изменение микротвёрдости азотированных образцов (*a*) и зависимость скорости истирания азотированных образцов от времени азотирования (*b*)

Fig. 2. Change in microhardness of nitrided samples (*a*) and dependence of the wear rate of nitrided samples on the nitriding time (*b*)

Рентгенофазовый анализ образцов сплава ВТ6 с нанесёнными плёнками и последующей ионно-лучевой обработкой ионами азота (рис. 3) показал наличие α -Ti (card № 44-1294), нитрида титана TiN (card № 38-1420), оксинитрида титана $\text{TiO}_{0.34}\text{N}_{0.74}$ (card № 44-951) и алюминитрида титана Ti_3AlN (card № 37-1140).

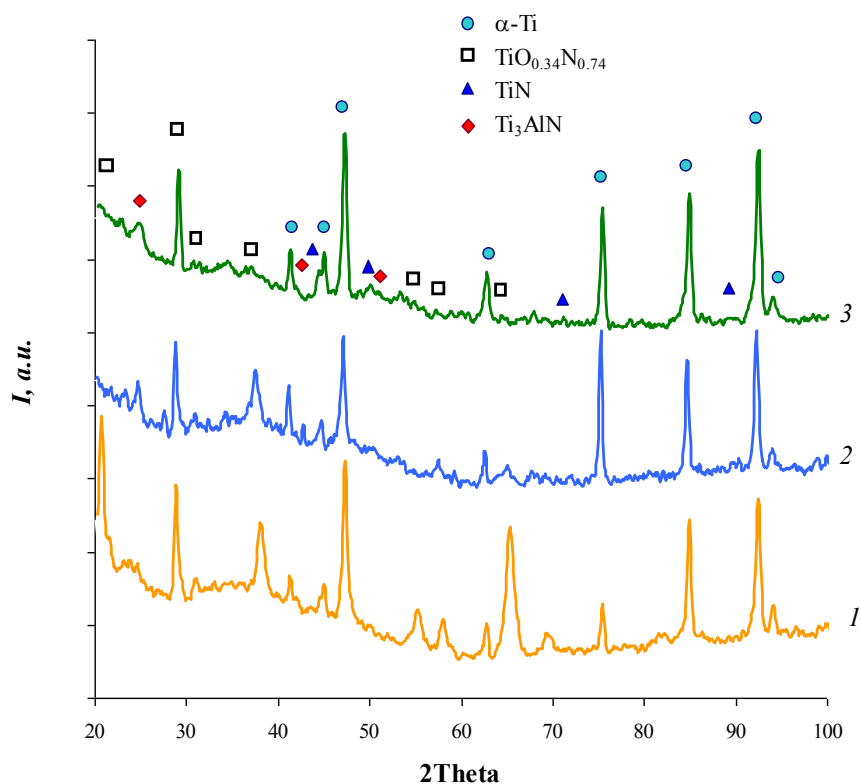


Рис. 3. Дифрактограмма тонких плёнок нитрида титана на пластинах из титанового сплава ВТ6 при процентном содержании азота в рабочей смеси: 1 – 2 %, 2 – 10 %, 3 – 20 %

Fig. 3. Diffraction pattern of thin films of titanium nitride on plates of titanium alloy VT6 with the percentage content of nitrogen in the working mixture: 1 – 2 %, 2 – 10 %, 3 – 20 %

Дифракционные линии α -Ti являются узкими. Дифракционные линии нитрида титана – более широкие, что может свидетельствовать о дисперсности зёрен TiN. Их интенсивность низкая. Значительнее проявляется оксинитрид титана. Его наличие можно связать с тем, что титановая подложка является своего рода геттером, т.е. она послужила источником кислорода, который вступил в реакцию и способствовал формированию фазы $\text{TiO}_{0.34}\text{N}_{0.74}$. Видимо небольшое количество кислорода в остаточной газовой среде вакуумной камеры достаточно для формирования оксида титана, тем более что с точки зрения термодинамики [15] формирование оксида титана более благоприятно, чем нитрида. В [10] отмечено, что ионно-плазменное азотирование (ИПА) при низких температурах приводит к образованию на поверхности различного вида оксидов.

Параметры решетки α -Ti после нанесения слоёв нитрида титана с последующей обработкой ионами азота составили $a = (2.928 \pm 0.001) \text{ \AA}$ и $c = (4.671 \pm 0.001) \text{ \AA}$.

Микротвёрдость образцов с напылёнными плёнками нитрида титана с последующей ионно-лучевой обработкой увеличилась приблизительно в 5 раз (рис. 4, а).

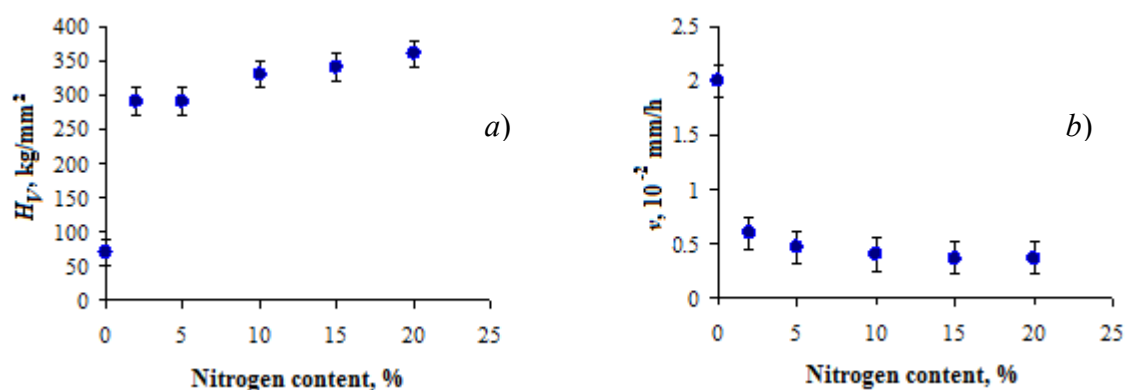


Рис. 4. Изменение микротвёрдости образцов с напылёнными плёнками нитрида титана с последующей ионно-лучевой обработкой (а) и зависимость скорости истирания (b) образцов с напылёнными плёнками нитрида титана от процентного содержания азота в рабочей смеси

Fig. 4. Change in microhardness of samples with deposited titanium nitride films with subsequent ion-beam treatment (a) and the dependence of the abrasion rate (b) of samples with deposited titanium nitride films on the percentage of nitrogen in the working mixture

Скорость истирания образцов с напылёнными плёнками нитрида титана с последующей ионно-лучевой обработкой уменьшилась приблизительно в 5 раз (рис. 4, b). При этом никаких отслаиваний и задиров плёнок не обнаружено.

Азот, при поглощении титаном, образует с α -Ti и β -Ti твёрдые растворы внедрения разной предельной концентрации [16]. Твёрдые растворы внедрения характеризуются увеличением параметров решётки растворителя при повышении содержания растворённого компонента. В нашем случае происходит уменьшение параметров решётки α -Ti. Такое уменьшение согласуется с [17] где показано, что после обработки низкоэнергетическим импульсным электронным пучком поверхности сплава Ti-6Al-4V может происходить уменьшение параметров кристаллической решётки α -Ti по сравнению с состоянием до обработки. Такое изменение авторы связывают с увеличением концентрации алюминия в поверхностных слоях, вызванной облучением. Кроме того, в случае образцов ВТ6 с нанесёнными плёнками ионно-лучевая обработка приводит к появлению перовскитоподобной фазы алюмонитрида титана.

Увеличение поверхностной микротвёрдости связано с образованием нитридного слоя, имеющего характерный золотистый оттенок [11]. Уменьшение концентрации азота в твёрдом растворе по мере удаления от нитридного слоя вглубь материала приводит к снижению твёрдости по глубине диффузионной зоны [14, 18].

Покрyтия (Ti, Al)N обладают повышенной стойкостью к окислительному износу, высокой твёрдостью по Виккерсу – до 37 ГПа, имеют коэффициент трения по стали 0.3–0.6, благодаря чему используются для операций с большими термическими нагрузками – при высокоскоростной обработке, резании материалов с пониженной теплопроводностью [19].

Нанесение нитрида титана на поверхность сплава титана ВТ6 способствует скоплению азота на поверхности. Ионно-лучевая обработка, вероятно, приводит к образованию небольшого диффузионного слоя на границе раздела плёнка-подложка. Причиной образования слоя может являться так называемый «эффект дальнего действия». При воздействии на материалы ионными пучками образуются зоны радиационного влияния на больших глубинах, иногда на несколько порядков превышающих пробеги ионов [20]. Зона радиационного влияния представляет собой структурно-измененный слой с повышенной микротвёрдостью, в котором обнаруживаются аномально большие концентрации дефектов структуры (дислокационные петли, поры, дефекты упаковки), появляются новые кристаллические фазы [21]. Данный эффект модификации структуры показали экспериментальные исследования, в частности в работе [22]. Кроме структурных изменений «эффект дальнего действия» может сопровождаться сверхглубоким массопереносом, который, как правило, наблюдается при высоких плотностях тока и сравнительно низкой энергии ионов [21]. Вопросы особенностей современных плазменных технологий азотирования затронуты в работе [23]. Согласно данной работе комбинация двух технологий, а именно ионно-лучевой обработки и ионно-плазменного нанесения покрытия, может существенно дополнить и расширить возможности модификации функциональных и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей. В нашем случае нанесение плёнки нитрида титана и последующая ионно-лучевая обработка приводит к появлению алюмонитридной фазы, которая характеризуется повышенной твёрдостью.

Таким образом, при азотировании на поверхности сплава титана образуются многослойные структуры, состоящие из слоя нитрида титана с включением окисной и гидридной фаз, диффузионного слоя, который плавно переходит в основной объём материала. Для определения толщины данных слоёв требуются дополнительные исследования методами металлографии травленных шлифов, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии, рентгеновской рефлектометрии, анализ поверхности поперечных сечений образцов, образующихся в результате хрупкого разрушения материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты сравнения процессов ионно-плазменного азотирования титана марки ВТ6 на модернизированной установке УВН71-ПЗ и азотирования посредством нанесения плёнок нитрида титана с последующей ионно-лучевой обработкой в среде газовой смеси аргона и азота на модернизированной установке УРМ 3.279.029.

Все образцы титана марки ВТ6 и после ионно-плазменного азотирования, и после нанесения тонких плёнок с последующей обработкой имели характерный золотистый оттенок.

Рентгенофазовый анализ образцов ВТ6 после ионно-плазменного азотирования показал наличие $\text{TiN}_{0.26}$ и TiN . Азотирование посредством нанесения плёнок нитрида титана и ионно-лучевой обработки приводит к образованию на поверхности фаз TiN , оксинитрида титана $\text{TiO}_{0.34}\text{N}_{0.74}$ и алюмонитрида титана Ti_3AlN . Параметры решётки α -Ti уменьшаются, что может быть связано с увеличением концентрации алюминия в поверхностных слоях, вызванной облучением. Кроме того, дополнительно проведённая ионно-лучевая обработка приводит к появлению перовскитоподобной фазы алюмонитрида титана.

Получено, что в результате ионно-плазменного азотирования микротвёрдость увеличилась в 3 раза. Азотирование посредством нанесения плёнок нитрида титана и ионно-лучевой обработки приводит к увеличению микротвёрдости в 5 раз. Азотирование посредством нанесения плёнок нитрида титана с последующей ионно-лучевой обработкой

приводит к уменьшению скорости истирания в 5 раз, а ионно-плазменное азотирование в 4 раза.

Ионно-лучевая обработка, вероятно, приводит к образованию небольшого диффузионного слоя на границе раздела плёнка-подложка, определение толщины которого требует дополнительных исследований. Причиной образования диффузионного слоя может являться так называемый «эффект дальнего действия».

Выявлена перспективность использования технологии азотирования титана посредством нанесения плёнок нитрида титана с последующей ионно-лучевой обработкой: данная технология требует значительно меньшего времени и обеспечивает лучшие показатели по микротвёрдости и истираемости.

Работы проведены на оборудовании Центра коллективного пользования УдГУ (ЦКПП ИЦРТ). Авторы выражают благодарность и признательность Щепоткиной Алёне Дмитриевне за тесное сотрудничество при проведении исследований микротвёрдости.

The work was carried out on the equipment of the Center for Collective Use of Udmurt State University (CCPU ICRT). The authors express their gratitude and appreciation to Alena Dmitrievna Shchepotkina for close cooperation in conducting microhardness studies.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солонина О. П., Глазунов С. Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 448 с.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы. Пер. с нем. Под ред. О.П. Елютина и С.Г. Глазунова. М.: Металлургия, 1979. 512 с.
3. Yang Y., Zhang C., Wang Y., Dai Y., Luo J. Friction and wear performance of titanium alloy against tungsten carbide lubricated with phosphate ester // *Tribology International*, 2016, vol. 95, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.031>
4. Farokhzadeh K., Edrisy A. Transition between mild and severe wear in titanium alloys // *Tribology International*, 2016, vol. 94, pp. 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.020>
5. Li X. X., Zhou Y., Li Y. X., Ji X. L., Wang S. Q. Dry sliding wear characteristics of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy at various sliding speeds // *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, vol. 46, iss. 9, pp. 4360–4368. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3019-9>
6. Cheng J., Li F., Qiao Z., Zhu S., Yang J., Liu W. The role of oxidation and counterface in the high temperature tribological properties of TiAl intermetallics // *Materials and Design*, 2015, vol. 84, pp. 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.115>
7. Long M., Rack H. J. Friction and surface behavior of selected titanium alloys during reciprocating-sliding motion // *Wear*, 2001, vol. 249, iss. 1–2, pp. 157–167. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00517-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00517-8)
8. Mao Y. S., Wang L., Chen K. M., Wang S. Q., Cui X. H. Tribo-layer and its role in dry sliding wear of Ti–6Al–4V alloy // *Wear*, 2013, vol. 297, iss. 1–2, pp. 1032–1039. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.063>
9. Коршунов Л. Г., Черненко Н. Л. Влияние фрикционной обработки на структуру и износостойкость поверхностного слоя титана VT1-0, подвергнутого азотированию // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2014. Т. 16, № 4. С. 31–48.

REFERENCES

1. Solonina OP, Glazunov SG (1976) *Zharoprochnye titanovye splavy* [Heat-resistant titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ.
2. Ulrich Zwicker (1974) *Titan and Titanlegierungen*. Springer Berlin Heidelberg.
3. Yang Y, et al. (2016) Friction and wear performance of titanium alloy against tungsten carbide lubricated with phosphate ester. *Tribology International* 95: 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.031>
4. Farokhzadeh K, Edrisy A (2016) Transition between mild and severe wear in titanium alloys. *Tribology International* 94: 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.020>
5. Li X. X., et al. (2015) Dry sliding wear characteristics of Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy at various sliding speeds. *Metallurgical and Materials Transactions A* 46(9): 4360–4368. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3019-9>
6. Cheng J., et al. (2015) The role of oxidation and counterface in the high temperature tribological properties of TiAl intermetallics. *Materials and Design* 84: 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.115>
7. Long M, Rack HJ (2001) Friction and surface behavior of selected titanium alloys during reciprocating-sliding motion. *Wear* 249(1–2): 157–167. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00517-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00517-8)
8. Mao YS, et al. (2013) Tribo-layer and its role in dry sliding wear of Ti–6Al–4V alloy. *Wear* 297(1–2): 1032–1039. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.063>
9. Korshunov LG, Chernenko NL (2014) Vliyanie friktsionnoy obrabotki na strukturu i iznosostoykost' poverkhnostnogo sloya titana VT1-0, podvergnutogo azotirovaniyu [Effect of friction treatment on the structure and wear resistance of the surface layer of titanium VT1-0 subjected to nitriding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo*

10. Дробов А. Н., Босяков М. Н., Поболь И. Л. Влияние ионно-плазменного азотирования (ИПА) на износостойкость и характер изменения шероховатости поверхности титановых сплавов VT1-0, VT6 и OT4-1 // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 78–83.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-78-83>
11. Агзамов Р. Д., Тагиров А. Ф., Николаев А. А. Исследование влияния режимов низкотемпературного ионного азотирования на структуру и свойства титанового сплава VT6 // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. Т. 21, № 4(78). С. 11–17.
12. Прошутин Н. А., Крылов П. Н., Закирова Р. М. Ионно-плазменное азотирование алюминия // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25, № 1. С. 96–104.
<https://doi.org/10.15350/17270529.2023.1.10>
13. Ветошкин В. М., Закирова Р. М., Крылов П. Н., Суворов И. А. Высоковакуумная установка для нанесения и ионно-лучевой обработки прозрачных проводящих пленок // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21, № 1. С. 57–59.
14. Достанко А. П., Голосов Д. А., Завадский С. М., Мельников С. Н., Окоджи Д. Э., Котинго Д. Д., Рубан Г. М. Формирование пленок нитрида титана методом реактивного магнетронного распыления при пониженном давлении // Проблемы физики, математики и техники. 2016. № 2 (27). С. 12–13.
15. Хамдохов А. З. Структурно-фазовая однородность субмикронных пленок нитрида титана и способы ее повышения: дисс. канд. техн. наук. КБГУ им. Х.М. Бербекова, Нальчик. 2017. 103 с.
16. Гуляев А. П. Металловедение. Учебник для вузов. 5-е изд. М.: Металлургия, 1977. 648 с.
17. Перевалова О. Б., Коновалова Е. В., Конева Н. А. Влияние концентрации алюминия на параметры решетки и среднеквадратичные смещения атомов в сплавах Cu–Al и Ti–6Al–4V // Известия РАН. Серия физическая. 2019. Т. 83, № 6. С. 764–768. <https://doi.org/10.1134/S0367676519060231>
18. Орлов А. А. Влияние термической и вакуумной ионноплазменной обработок на структуру и свойства полуфабрикатов и изделий из сплавов медицинского назначения: дисс. канд. техн. наук. МАИ, М., 2022. 163 с.
19. Назаров А. Ю. Разработка композиционных покрытий на основе интерметаллидов системы Ti–Al, синтезированных в среде реакционных газов: дисс. канд. техн. наук. МАИ, М., 2019. 129 с.
20. Тетельбаум Д. И., Баянкин В. Я. Эффект дальнего действия // Природа. 2005. № 4. С. 9–17.
10. Drobov AN, Bosyakov MN, Pobol' IL (2022) Vliyanie ionno-plazmennogo azotirovaniya (IPA) na iznosostoykost' i kharakter izmeneniya sherokhovatosti poverkhnosti titanovykh splavov VT1-0, VT6 i OT4-1 [The effect of ion-plasma nitriding on the enduring quality and the nature of changes in the surface roughness of titanium alloys VT1-0, VT6 and OT4-1]. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy] 2: 78–83. (In Russian). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-78-83>
11. Agzamov RD, Tagirov AF, Nikolaev AA (2017.) Issledovanie vliyaniya rezhimov nizkotemperaturnogo ionnogo azotirovaniya na strukturu i svoystva titanovogo splava VT6 [Study of influence of low-temperature ion nitriding modes on the structure and properties of titanium alloy VT6]. *Vestnik Ufinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik UGATU] 21(4-78): 11–17. (In Russian).
12. Proshutin NA, Krylov PN, Zakirova RM (2023) Ionno-plazmennoe azotirovanie alyuminiya [Ion-plasma nitriding of aluminum]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy] 25(1): 96–104. (In Russian). <https://doi.org/10.15350/17270529.2023.1.10>
13. Vetoshkin VM, et al. (2011) Vysokovakuumnaya ustanovka dlya nanesheniya i ionno-luchevoy obrabotki prozrachnykh provodyashchikh plenok [High-vacuum installation for deposition and ion-beam processing of transparent conducting films]. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya* [Vacuum Engineering and Technology] 21(1): 57–59. (In Russian).
14. Dostanko AP, et al. (2016) Formirovanie plenok nitrida titana metodom reaktivnogo magnetronnogo raspyleniya pri ponizhenom davlenii [Formation of titanium nitride films by reactive magnetron sputtering under low d pressure]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki* [Problems of Physics, Mathematics and Technics] 2(27): 12–13. (In Russian).
15. Khamdokhov AZ (2017) *Strukturno-fazovaya odnorodnost' submikronnykh plenok nitrida titana i sposoby ee povysheniya* [Structural and phase homogeneity of submicron titanium nitride films and methods for its improvement]. Diss. kand. tekhn. nauk. KBGU im. Kh.M. Berbekova, Nalchik.
16. Gulyaev AP (1977) *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ.
17. Perevalova OB, Konovalova EV, Koneva NA (2019) Effect of aluminum concentration on the lattice parameters and mean-square displacements of atoms in Cu–Al and Ti–6Al–4V alloys. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 83(6): 693–696. <https://doi.org/10.3103/S1062873819060236>
18. Orlov AA (2022) *Vliyanie termicheskoy i vakuumnoy ionnoplazmennoy obrabotok na strukturu i svoystva polufabrikatov i izdeliy iz splavov meditsinskogo naznacheniya* [Influence of thermal and vacuum ion-plasma treatments on the structure and properties of semi-finished products and articles made of medical alloys]. Diss. kand. tekhn. nauk. MAI, Moscow.
19. Nazarov AY (2019) *Razrabotka kompozitsionnykh pokrytiy na osnove intermetallidov sistemy Ti-Al, sintezirovannykh v srede reaktsionnykh gazov* [Development of composite coatings based on intermetallic compounds of the Ti-Al system synthesized in a reaction gas environment]. Diss. kand. tekhn. nauk. MAI, Moscow.
20. Tetel'baum DI, Bayankin VY (2005) Effekt dal'nodeystviya [Distant Effects of Ion Implantation]. *Priroda* [Nature] 4: 9–17. (In Russian).

21. Степанов В. А., Хмелевская В. С. Радиационно-индуцированная пластическая деформация и "эффект дальнего действия" // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, вып. 9. С. 52–56.

22. Пушкарев А. И., Егорова Ю. И., Полисадов С. С. Эффект дальнего действия при модификации приповерхностных слоев образцов WC-Co импульсным ионным пучком // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2024. № 2. С. 94–100. <https://doi.org/10.31857/S1028096024020141>

23. Гришкевич А. Д. Разработка комбинированной технологии упрочнения деталей // Техническая механика. 2017. № 3. С. 96–111.

21. Stepanov VA, Khmelevskaya VS (2011) Radiation-induced plastic deformation and the long-range effect. *Technical Physics* 56(9): 1272–1276. <https://doi.org/10.1134/S1063784211090246>

22. Pushkarev AI, Egorova YI, Polisadov SS (2024) Effect of long-range interaction in the modification of near-surface layers of WC–Co samples by pulsed ion beam. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* 18(1): 222–228. <https://doi.org/10.1134/S1027451024010348>

23. Grishkevich AD (2017) Razrabotka kombinirovannoy tekhnologii uprochneniya detaley [Development of a combined technology for hardening parts]. *Tekhnicheskaya mekhanika* [Technical Mechanics] 3: 96–111. (In Russian).

Поступила 06.06.2025; после доработки 26.08.2025; принята к опубликованию 17.09.2025
Received June 6, 2025; received in revised form August 26, 2025; accepted September 17, 2025

Информация об авторах

Федотова Ирина Витальевна,
кандидат физико-математических наук, доцент, УдГУ,
Ижевск, Российская Федерация

Орлова Надежда Александровна,
кандидат физико-математических наук, доцент, УдГУ,
Ижевск, Российская Федерация

Закирова Раушания Мазитовна,
кандидат физико-математических наук, доцент, УдГУ,
Ижевск, Российская Федерация, e-mail: ies@udsu.ru

Крылов Петр Николаевич,
кандидат физико-математических наук, профессор
кафедры теоретической и экспериментальной физики,
УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Кобзиев Владимир Федорович,
ведущий инженер, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Приходько Василий Анатольевич,
ведущий технолог, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Information about the author

Irina V. Fedotova,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Udmurt State
University, Izhevsk, Russian Federation

Nadezhda A. Orlova,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Udmurt State
University, Izhevsk, Russian Federation

Raushaniya M. Zakirova,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Udmurt State
University, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: ies@udsu.ru

Petr N. Krylov,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of
Theoretical and Experimental Physics, Udmurt State University,
Izhevsk, Russian Federation

Vladimir F. Kobziev,
Leading Engineer, Udmurt State University, Izhevsk, Russian
Federation

Vasily A. Prihodko,
Leading technologist, Udmurt State University, Izhevsk, Russian
Federation