



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-78-83>  
УДК 621.785.5

Поступила 10.03.2022  
Received 10.03.2022

## ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT1-0, VT6 И OT4-1

А. Н. ДРОБОВ, М. Н. БОСЯКОВ, И. Л. ПОБОЛЬ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: drobovandreya@yandex.by

*Исследовано влияние температуры процесса ионно-плазменного азотирования на износостойкость получаемых упрочненных слоев на титане VT1-0 и титановых сплавах VT6 и OT4-1 и влияние ионно-плазменного азотирования на изменение параметра  $R_a$  шероховатости поверхности титановых образцов. Установлено, что ионно-плазменное азотирование ведет к существенному повышению износостойкости исследуемых титановых сплавов. Глубина канавки износа у необработанных образцов титана VT1-0, сплавов VT6, OT4-1 составляла 11, 7 и 10 мкм соответственно, тогда как у образцов после ионно-плазменного азотирования – 1,9, 0,9, 2,1 мкм. Выявлено, что при исходной шероховатости обрабатываемых образцов более  $R_a$  0,1 мкм после ионного азотирования снижается показатель шероховатости  $R_a$ , один из ключевых составляющих качества поверхности.*

**Ключевые слова.** Ионно-плазменное азотирование, диффузионный слой, упрочнение поверхности, нитрид титана, шероховатость поверхности, износостойкость.

**Для цитирования.** Дробов, А. Н. Влияние ионно-плазменного азотирования на износостойкость и характер изменения шероховатости поверхности титановых сплавов VT1-0, VT6 и OT4-1 / А. Н. Дробов, М. Н. Босяков, И. Л. Поболь // *Литье и металлургия*. 2022. № 2. С. 78–83. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-78-83>.

## 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

A. N. DROBOV, M. N. BOSYAKOV, I. L. POBOL, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: drobovandreya@yandex.by

*The effect of the temperature of the ion-plasma nitriding process on the enduring quality of the resulting hardened layers on titanium VT1-0 and titanium alloys VT6 and OT4-1 and the effect of ion-plasma nitriding on the change in the  $R_a$  parameter of the surface roughness of titanium samples is investigated. It is defined that ion-plasma nitriding leads to a significant increase in the enduring quality of the titanium alloys under study. The depth of the enduring quality groove in untreated samples of titanium VT1-0, alloys VT6, OT4-1 was 11, 7 and 10 microns, respectively, whereas in samples after ion-plasma nitriding, the wear groove had a depth of 1.9, 0.9, 2.1 microns. It was revealed that when the initial roughness of the processed samples is more than  $R_a$  0.1 microns after ion nitriding, the roughness index  $R_a$ , one of the key components of surface quality, decreases.*

**Keywords.** Ion-plasma nitriding, diffusion layer, surface hardening, titanium nitride, surface roughness, enduring quality.

**For citation.** Drobov A. N., Bosyakov M. N., Pobol I. L. 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. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 78–83. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-78-83>.

### Введение

Титановые сплавы широко применяются в авиации, ракетостроении, космической технике, судостроении, машиностроении, черной и цветной металлургии, целлюлозно-бумажной, пищевой и химической промышленности, атомной энергетике, медицине, приборостроении, электронике. Это объясняется уникальным сочетанием механических, технологических, физических и химических свойств сплавов титана: высокой механической прочности при высокой температуре, низким модулем упругости, малой плотностью, тугоплавкости, коррозионной стойкости, немагнитности, биологической инертности и др. Малый удельный вес и высокая прочность сплавов титана делают их весьма ценными материалами.

В области самолетостроения и производства авиационных двигателей титан все больше вытесняет алюминий и нержавеющей сталь. В авиастроении титан используется при изготовлении обшивки корпуса, крыльев, крепежа, частей газотурбинных реактивных двигателей, предкрылков и закрылков, деталей гидросистемы и др. Многие производители самолетов идут по пути увеличения доли титана в деталях планера самолета (несущей конструкции летательного аппарата). Важное место титан и его сплавы занимают в медицине. Они обладают высокой усталостной прочностью при знакопеременных нагрузках, что очень важно при изготовлении внутрикостных фиксаторов, наружных и внутренних протезов медицинских имплантатов, которые постоянно подвергаются переменным нагрузкам.

Однако исходных свойств титановых сплавов не всегда достаточно для различных областей их применения. Как правило, титановые сплавы для достижения необходимого комплекса свойств необходимо подвергать упрочняющей обработке. Одним из наиболее перспективных видов поверхностного упрочнения является химико-термическая обработка, а в частности ионно-плазменное азотирование [1–3].

Известно, что при ионном азотировании титановых сплавов на их поверхности формируется нитридная пленка, отрицательно влияющая на эффективность процесса, так как скорость диффузии азота в нитриде титана во много раз меньше, чем в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах [4]. Поэтому нахождение эффективного способа предотвращения формирования нитридной пленки в течение процесса даст возможность получить технологические возможности, которые позволят более полно контролировать распределение свойств в поверхностных слоях титановых сплавов за счет управления параметрами технологического процесса [5].

Целью настоящей работы является исследование влияния параметров процесса ионного азотирования (прежде всего температуры) на износостойкость титана ВТ1-0, сплавов ВТ6 и ОТ4 и характер изменения шероховатости поверхности азотированных образцов.

### Материалы, оборудование и методики исследования

Для проведения исследований применяли образцы  $\alpha$ - (ВТ1-0),  $\alpha+\beta$ - (ВТ6) и псевдо- $\alpha$ - (ОТ4-1) в виде дисков из отожженных прутков диаметром 25 мм. Процесс ионного азотирования проводили на лабораторной установке разработки и производства ФТИ НАН Беларуси при температуре 850 °С с выдержкой от 1 до 7 ч. Разогрев образцов осуществляли в атмосфере аргона, а на стадии выдержки рабочая смесь представляла собой 10 об. %  $N_2$  и 90 об. % Ar. Стандартное оснащение установки ИПА – катод и оснастка из сталей не позволяет выполнять процесс азотирования титановых сплавов, для выполнения процесса разработана специализированная оснастка из титана для минимизации влияния распыленного железа катода на обрабатываемые образцы.

Металлографические исследования выполняли с помощью оптического микроскопа МИ-1 с предварительным травлением образцов в 40%-ном водном растворе смеси HF и  $HNO_3$  в равных долях. МикродюрOMETрические исследования выполняли с использованием цифрового микротвердомера AFFRI-MVDM8 (нагрузка на индентор 10 г). Трибоиспытания проводили с помощью трибометра JLTV-02 (фирма J&L Tech Co.). В качестве контртела использовали стальной шарик из стали 95X18 диаметром 3 мм, нагрузка составляла 1000 мН, общее количество циклов трения – 7000. Линейная скорость перемещения образца относительно контртела составляла 4 мм/с. Глубину канавок износа после трибоиспытаний определяли с помощью профилографа Mitutoyo SurfTest SV-2100. Рентгенофазовый анализ проводили с помощью многоцелевого рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 в  $Cu-K_{\alpha}$ -излучении.

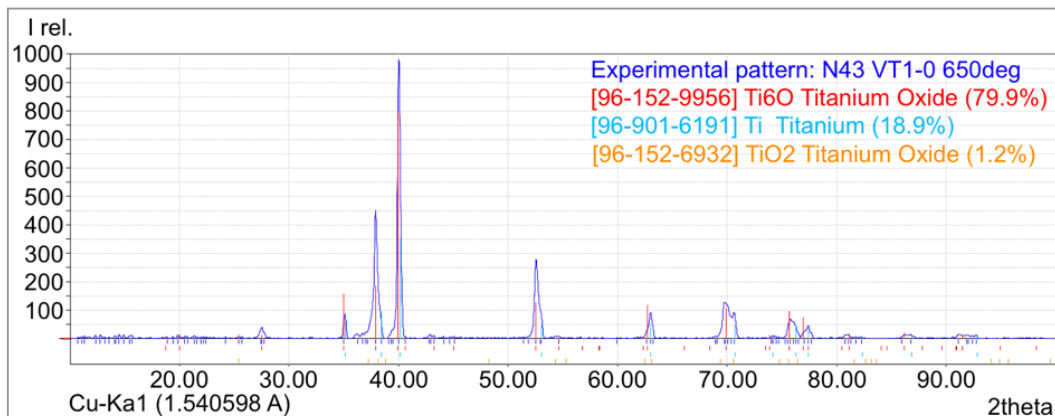
Для исследования влияния азотирования на характер изменения шероховатости поверхности образцы обрабатывали механически для получения параметров от  $R_a$  0,1 до 1 мкм.

### Рентгенофазовый анализ образцов после ИПА

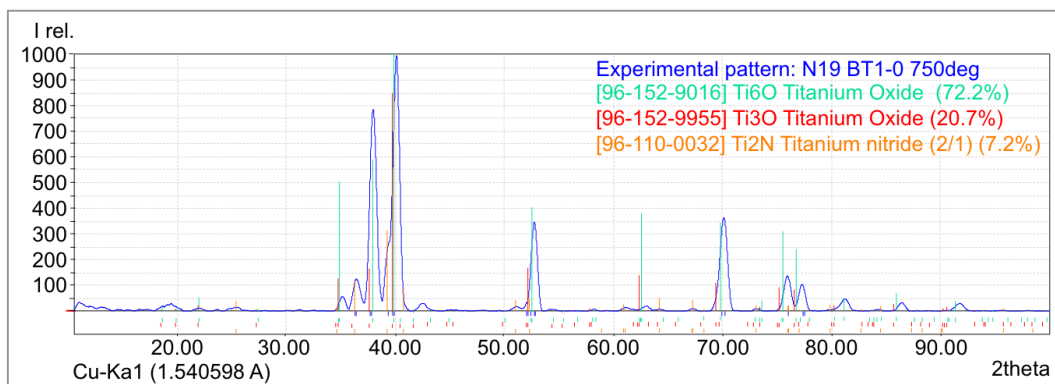
На основании предварительных исследований установлено, что процесс ИПА ВТ1-0 и сплава ОТ4-1 целесообразно проводить при температурах до 850 °С с выдержкой не более 7 ч. Более высокая температура ИПА приводит к росту размера зерна, а более длительная выдержка не приводит к заметному росту диффузионного и нитридного слоев, но влечет за собой дополнительные энергозатраты. Для сплава ВТ6 температура ИПА может быть увеличена до 900 °С, так как этот сплав менее подвержен росту зерен благодаря наличию легирующих элементов и более высокой температуры  $\alpha$ - $\beta$ -превращения. Нижняя граница температуры ИПА для всех исследуемых сплавов, обеспечивающая достаточную скорость насыщения, – 750 °С.

ИПА при низких температурах (<650 °С) приводит к образованию на поверхности различного вида оксидов (рис. 1, а). Пики нитридов титана выявляются у образцов, азотированных при 750 °С (рис. 1, б).

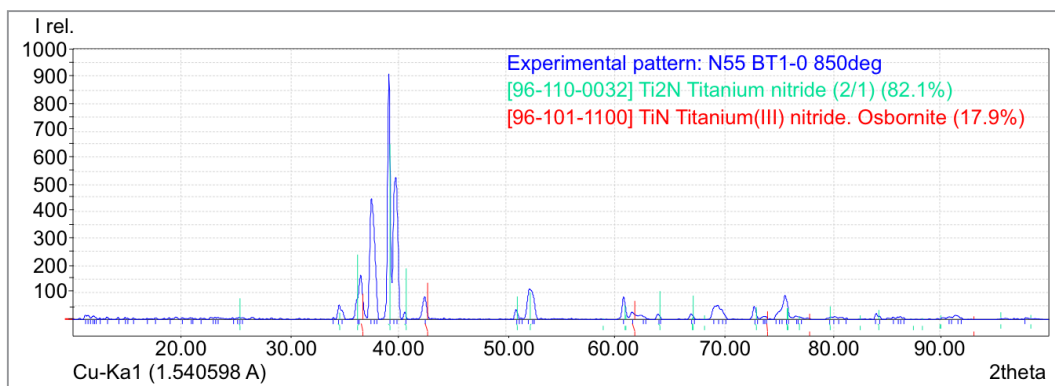
У образцов, азотированных при температуре 850 °С, на рентгенограммах обнаруживаются преимущественно пики нитридов титана  $TiN$  и  $Ti_2N$  (рис. 1, в). Так как характер рентгенограмм у всех исследуемых сплавов практически одинаковый, на рис. 1 приводятся данные для титана VT1-0.



а



б



в

Рис. 1. Рентгенограммы поверхности образцов из титана VT1-0 после ИПА при 650 °С (а), 750 °С (б) и 850 °С (в)

### Исследования влияния ИПА на износостойкость титана и его сплавов

Ранее нами показано, что при увеличении длительности процесса ИПА титана и его сплавов возрастает глубина упрочненного слоя [5] и достигает после 3 ч выдержки 70 мкм для VT6, 105 мкм для VT1-0 и 120 мкм для OT4-1. На рис. 2 приведены зависимости распределения микротвердости по глубине азотированного слоя на образцах из титана VT1-0, сплавов VT6 и OT4-1 при различной длительности выдержки.

В настоящей работе сравнивали стойкость к изнашиванию стальным шариком титана VT1-0, сплава VT6 и OT4-1 после ионного азотирования и в состоянии поставки.

После проведения трибоиспытаний замеряли профили канавок износа, оставленных контртелом при трении. На рис. 3–5 показаны зависимости влияния времени выдержки при азотировании на глубину канавки износа исследуемых сплавов после ИПА в сравнении с теми же сплавами в состоянии поставки.

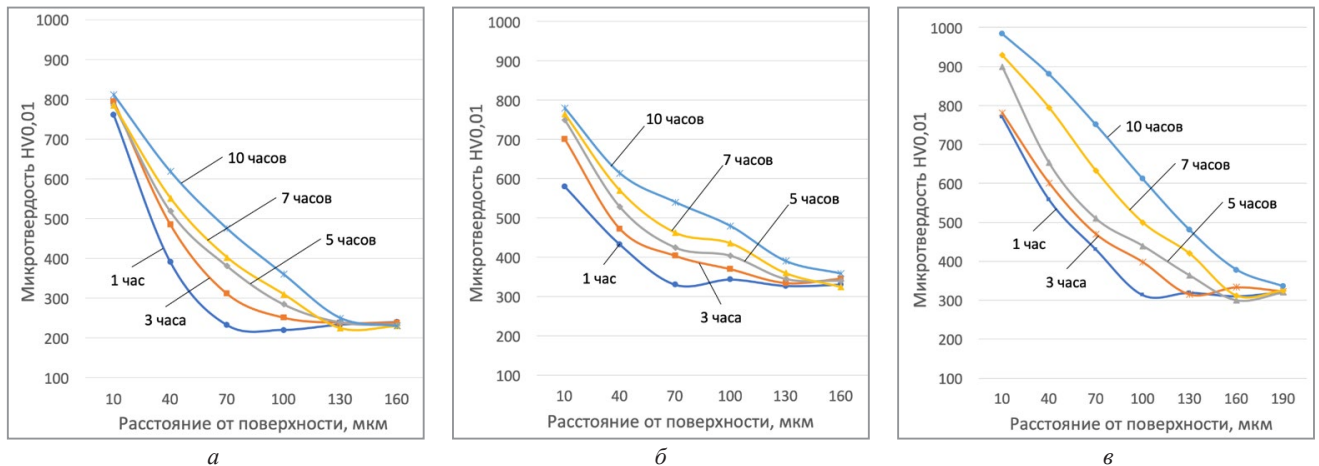


Рис. 2. Распределение микротвердости в образцах из титана VT1-0 (а), сплава VT6 (б) и OT4-1 (в) после ИПА при температуре 850 °С с временем выдержки от 1 до 10 ч

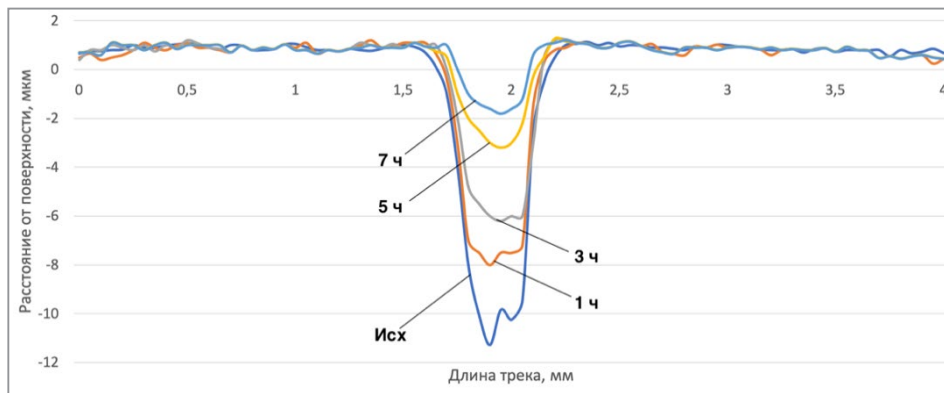


Рис. 3. Глубина канавки износа после трибоиспытаний титана VT1-0 в исходном состоянии и подвергнутых ИПА в течение 1, 3, 5 и 7 ч

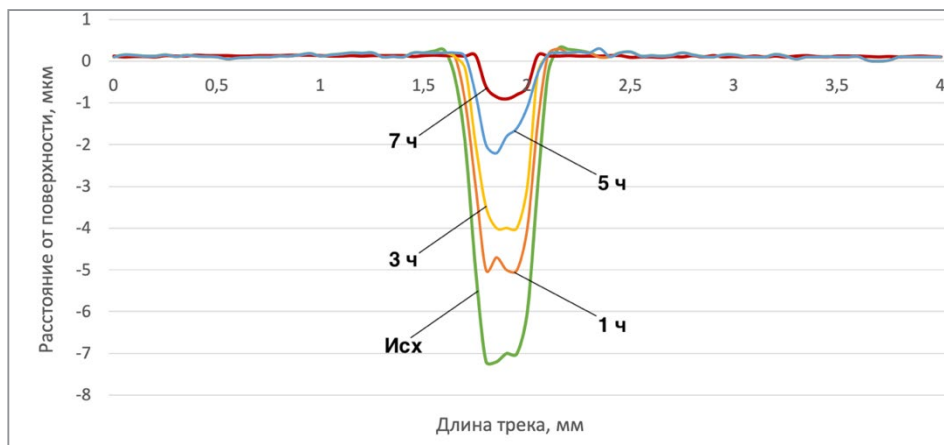


Рис. 4. Глубина канавки износа после трибоиспытаний сплава VT6 в исходном состоянии и подвергнутых ИПА в течение 1, 3, 5 и 7 ч

Из рисунков видно, что азотирование при 850 °С в течение 3 ч снижает глубину канавок износа исследуемых сплавов в 2 раза. Увеличение времени выдержки при ионном азотировании ведет к увеличению износостойкости, подчиняющееся линейному закону. Данное утверждение справедливо для всех исследуемых сплавов. Зависимости влияния времени выдержки при ионно-плазменном азотировании на изменение глубины канавок износа показаны на рис. 6 (отметка Исх на оси абсцисс соответствует глубине канавки на неупрочненных образцах).

С ростом длительности выдержки возрастает степень насыщенности материала поверхностного слоя упрочняющей фазой нитрида титана и его твердость. Имеется корреляция твердости сплава и его стойкости к абразивному изнашиванию.

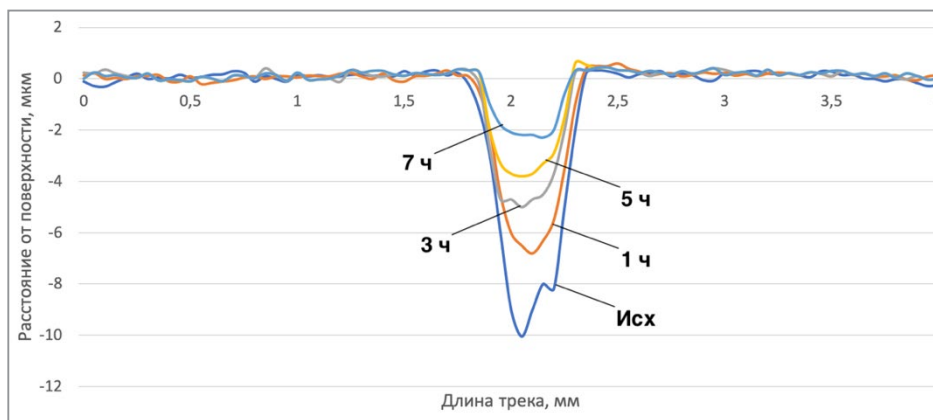


Рис. 5. Глубина канавки износа после трибоиспытаний сплава ОТ4-1 в исходном состоянии и подвергнутых ИПА в течение 1, 3, 5 и 7 ч

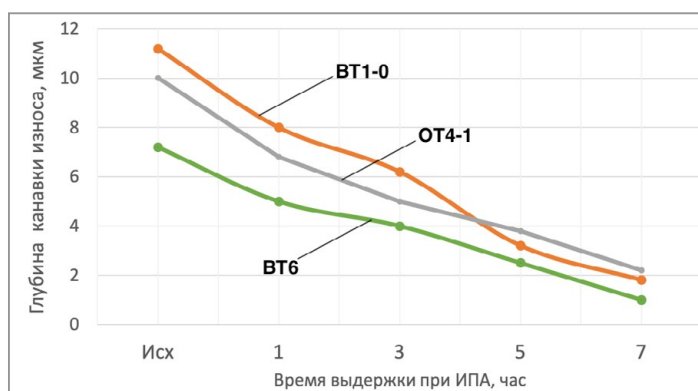


Рис. 6. Влияние времени выдержки при ионном азотировании титановых сплавов VT1-0 и VT6 на глубину канавки износа после трибоиспытаний

### Исследования влияния ИПА на изменение шероховатости поверхности

Исследования влияния ИПА на шероховатость поверхности проводили на титане VT1-0 и сплавах VT6 и OT4-1. Перед азотированием образцам придавали различную шероховатость поверхности с помощью механической обработки. Для каждого из образцов было выбрано пять значений исходной шероховатости  $R_a$ : 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 1,0 мкм. Образцы одновременно подвергали азотированию при 850 °С в течение 7 ч в газовой смеси, содержащей 10%  $N_2$  и 90% Ar.

Для всех исследованных сплавов выявлен одинаковый характер изменения состояния поверхности в результате ИПА. На рис. 7 показаны усредненные значения изменения шероховатости поверхности трех материалов с различной подготовкой поверхности при проведении обработки по одному режиму.

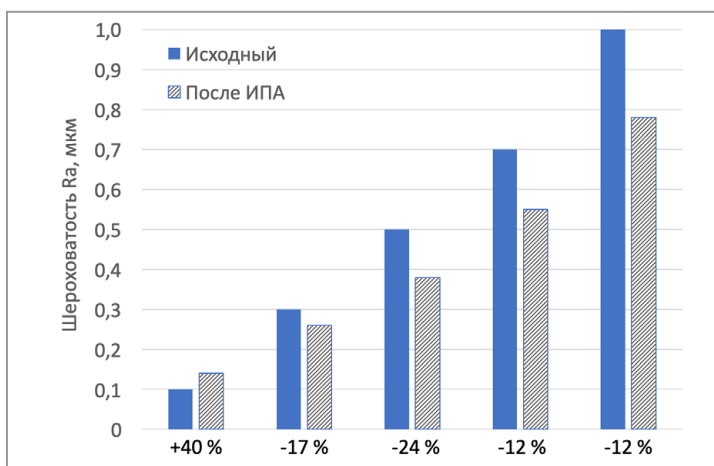


Рис. 7. Усредненные величины изменения шероховатости поверхности образцов из титановых сплавов VT1-0, VT6 и OT4-1 после ИПА

Обработка поверхностей с показателем шероховатости  $R_a$  0,1 мкм и менее приводит к увеличению параметра шероховатости  $R_a$  до 0,15 мкм. При исходной шероховатости более  $R_a$  0,1 мкм шероховатость на всех исследуемых сплавах снижалась (показатель  $R_a$  уменьшался). Это объясняется тем, что в процессе ИПА происходит бомбардировка поверхности образцов атомами Ag и  $N_2$ , что при малых значениях исходной шероховатости ведет к образованию на поверхности микронеровностей. В случае исходной шероховатости  $R_a$  более 0,1 мкм происходит заглаживание выступов и заполнение впадин, что приводит к снижению показателя  $R_a$ .

### Выводы

Ионно-плазменное азотирование существенно повышает износостойкость титана ВТ1-0 и сплавов ВТ6 и ОТ4-1. После 7000 циклов трения глубина канавки износа азотированных при 850 °С в течение 7 ч образцов из титана ВТ1-0 составила 1,9 мкм, на сплаве ВТ6 – 0,9, а на сплаве ОТ4-1 – 2,1 мкм. На необработанных образцах канавка износа была 11, 7 и 10 мкм соответственно.

При исходной шероховатости обрабатываемых образцов более  $R_a$  0,1 мкм после ионного азотирования снижается показатель шероховатости  $R_a$ , одна из составляющих качества поверхности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин, Д. С. Низкотемпературное азотирование титана в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления / Д. С. Вершинин, М. Ю. Смолякова // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 5. С. 15–20.
2. Рамазанов, К. Н. Ионное азотирование титанового сплава ВТ6 в тлеющем разряде с эффектом полого катода / К. Н. Рамазанов, И. С. Рамазанов // Вест. УГАТУ. 2014. № 2. С. 41–46.
3. Арзамасов, Б. Н. Влияние режимов ионного азотирования на структуру и свойства титановых сплавов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Громов, М. Д. Сосков // Металловедение и термическая обработка металлов. 1996. № 5. С. 26–28.
4. Metin, E. Formation and growth of iron nitrides during ion-nitriding / E. Metin, O. T. Inal // Journal of Materials Science. 1987. P. 2783–2788.
5. Поболь, И. Л. Исследование формирования упрочненных слоев на титановых сплавах методом ионно-плазменного азотирования / И. Л. Поболь, И. Г. Олешук, А. Н. Дробов, Сун Фун, Ван Лин // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2019. Т. 64. № 1. С. 25–34.

### REFERENCES

1. Vershinin D.S., Smoljakova M. Ju. Nizkotemperaturnoe azotirovanie titana v plazme nesamostojatel'nogo dugovogo razrjadaja nizkogo davlenija [Low-temperature nitriding of titanium in the plasma of a non-self-sustained low-pressure arc discharge]. *Fizika i himija obrabotki material = Physics and chemistry of material processing*, 2011, no. 5, pp. 15–20.
2. Ramazanov K.N., Ramazanov I.S. Ionnoe azotirovanie titanovogo splava VT6 v tlejushhem razrjadje s jeffektom pologo katoda [Ion nitriding of titanium alloy VT6 in a glow discharge with a hollow cathode effect]. *Vestnik UGATU = Bulletin of USATU*, 2014, no.2, pp. 41–46.
3. Arzamasov B.N., Gromov V.I., Soskov M.D. Vlijanie rezhimov ionnogo azotirovanija na strukturu i svojstva titanovyh splavov [Influence of ion nitriding regimes on the structure and properties of titanium alloys]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov = Metal science and heat treatment of metals*, 1996, no. 5, pp. 26–28.
4. Metin E., Inal O. T. Formation and growth of iron nitrides during ion-nitriding. *Journal of Materials Science*, 1987, pp. 2783–2788.
5. Pobol' I.L., Oleshuk I.G., Drobov A.N., Fun Sun, Lin Van. Issledovanie formirovanija uprochnennyh sloev na titanovyh splavah metodom ionno-plazmennogo azotirovanija [Investigation of the formation of hardened layers on titanium alloys by the method of ion-plasma nitriding]. *Vesci NAN Belarusi. Seryja fizika-tjehnichnyh navuk = Processing of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 25–34.