

УДК 669.295:621.785.532

## ВЛИЯНИЕ АЗОТИРОВАНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ6 И ВТ3-1

И. В. Золотов<sup>1</sup>, К. Н. Рамазанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>zolotov.ugatu@gmail.com, <sup>2</sup>ramazanovkn@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 21.06. 16

**Аннотация.** Предложен способ интенсификации процесса ионного азотирования титановых сплавов путем создания плазмы повышенной плотности в тлеющем разряде с полым катодом. Рассмотрено влияние ионного азотирования и азотирования в тлеющем разряде с полым катодом на микроструктуру, фазовый состав, микротвердость и износостойкость поверхностного слоя образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1.

**Ключевые слова:** ионное азотирование; титановые сплавы ВТ6 и ВТ3-1; тлеющий разряд с полым катодом.

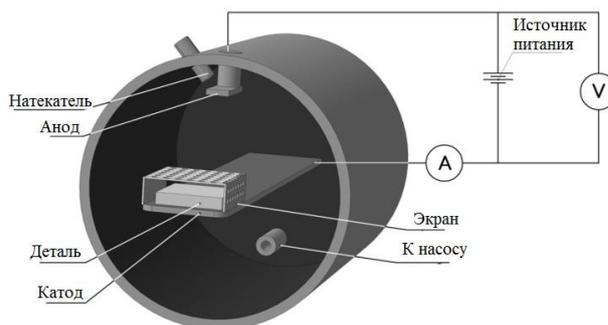
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время титановые сплавы имеют широкое применение в авиационной промышленности, что обусловлено уникальным сочетанием их физико-механических и технологических свойств: относительно низкая плотность, высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, жаропрочность. Однако их применение лимитировано рядом недостатков, связанных со свойствами поверхности титана и его сплавов. Низкая твердость и, как следствие, износостойкость поверхности, склонность к налипанию, большие коэффициенты трения в паре с подавляющим количеством материалов ограничивают применение титановых сплавов для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного трения и износа поверхности [1, 2].

В данной работе предложено использовать тлеющий разряд с полым катодом для создания плазмы повышенной плотности [3, 4], позволяющей производить эффективное ионное травление нитридной пленки, формирующейся на поверхности обрабатываемого титанового сплава, что в свою очередь ведет к интенсификации процесса ионного азотирования [5].

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 приведена схема модернизированной установки ЭЛУ5-М, которая использовалась для азотирования титановых сплавов в тлеющем разряде с полым катодом.



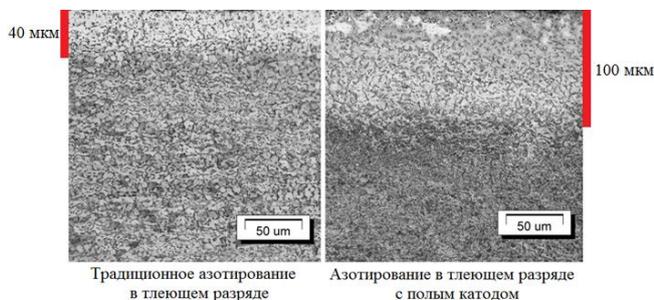
**Рис. 1.** Схема экспериментов по азотированию образцов в тлеющем разряде с полым катодом

Для создания катодной полости над образцом устанавливался экран из титанового сплава с отверстиями, который находился под тем же электрическим потенциалом (см. рис. 1).

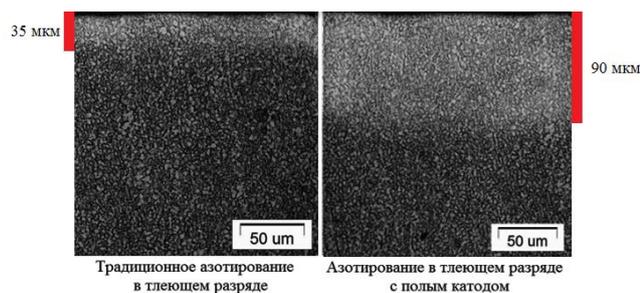
В качестве материала для образцов были выбраны двухфазные титановые сплавы ВТ6 и ВТ3-1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 и 3 представлены фотографии микроструктур поверхностного слоя образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1 после азотирования в тлеющем разряде и после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом при температуре 800°C в течение 8 ч.



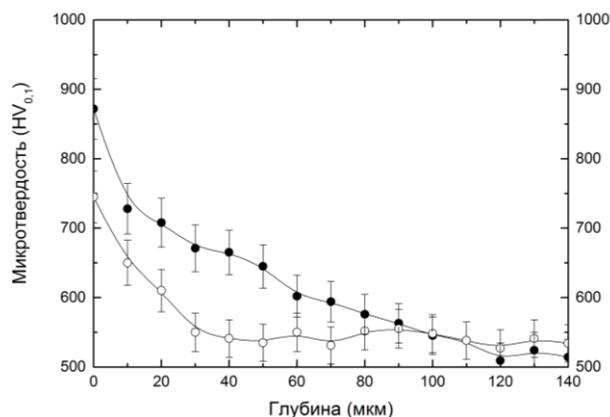
**Рис. 2.** Микроструктуры поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ6, азотированных в тлеющем разряде и в тлеющем разряде с полым катодом при температуре 800°C в течение 8 ч



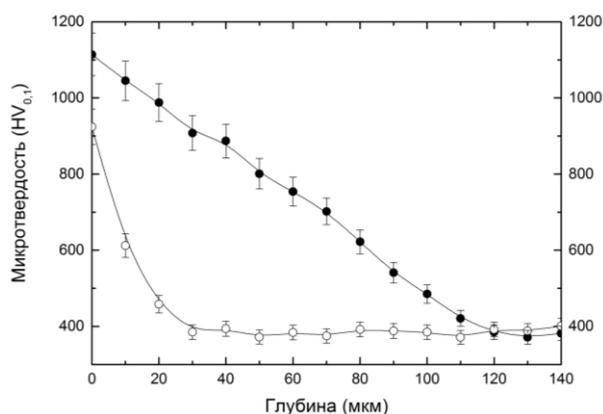
**Рис. 3.** Микроструктуры поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ3-1, азотированных в тлеющем разряде и в тлеющем разряде с полым катодом при температуре 800°C в течение 8 ч

Анализ микроструктуры поверхностного слоя показывает наличие на поверхности всех образцов светлого слабо травящегося слоя, предположительно состоящего преимущественно из  $\alpha$ -фазы, так как азот является  $\alpha$ -стабилизатором титана. Для обоих сплавов азотирование в тлеющем разряде с полым катодом в течение 8 ч позволяет добиться большей величины данного слоя приблизительно в 1,5–2 раза по сравнению с величиной слоя после традиционного азотирования в тлеющем разряде, при этом толщина этого слоя составляет ~90 мкм.

С целью определения толщины упрочненного слоя были получены распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя азотированных образцов. Данные распределения для титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1 приведены на рис. 4 и 5 соответственно.



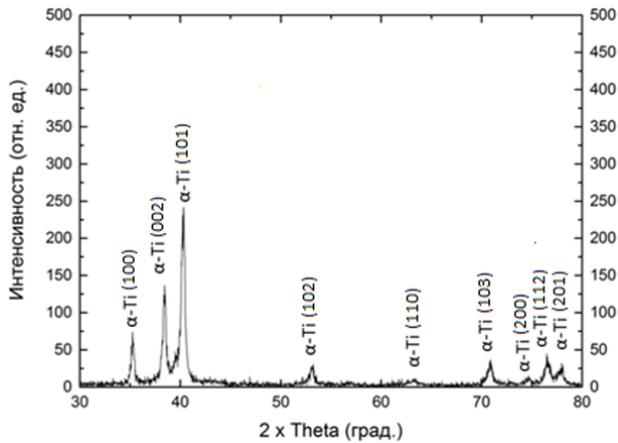
**Рис. 4.** Распределения микротвердости по толщине поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ6 после ионного азотирования (○) и после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом (●) при температуре 800°C в течение 8 ч



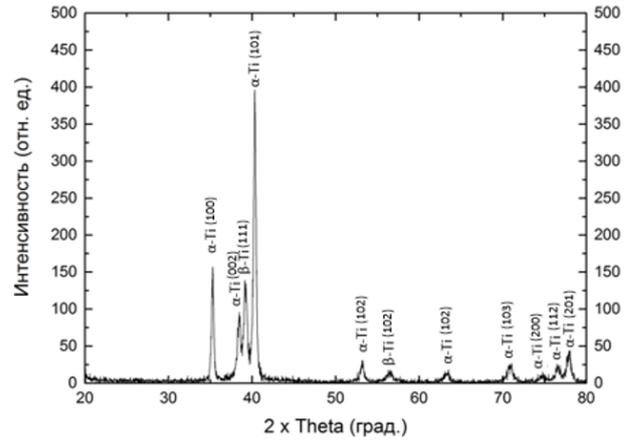
**Рис. 5.** Распределения микротвердости по толщине поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ3-1 после ионного азотирования (○) и после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом (●) при температуре 800°C в течение 8 ч

Азотирование титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1 в тлеющем разряде с полым катодом в течение 8 ч позволило получить прирост поверхностной микротвердости и толщины упрочненного слоя по сравнению с обычным ионным азотированием. Также профили микротвердости поверхностного слоя образцов, прошедших азотирование в тлеющем разряде с полым катодом, обладают меньшим градиентом, что положительно сказывается на качестве азотированного слоя.

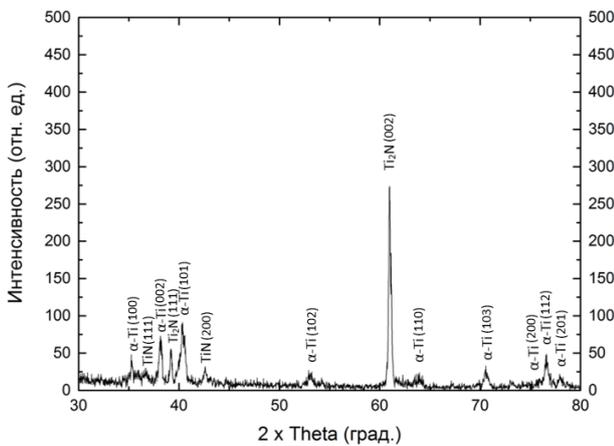
На рис. 6–11 представлены полученные дифрактограммы с поверхности образцов из титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1 в исходном состоянии, после обработки в тлеющем разряде и в тлеющем разряде с полым катодом.



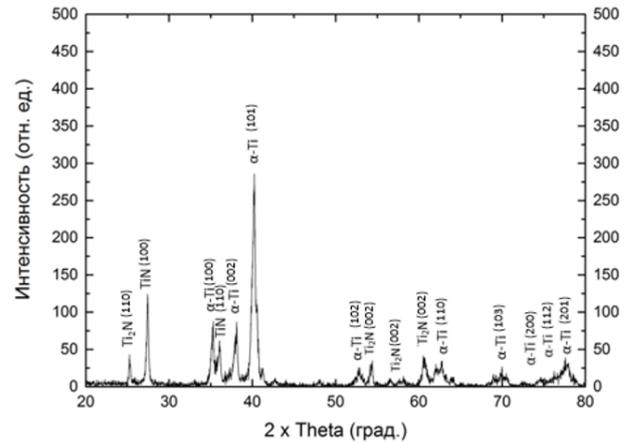
**Рис. 6.** Дифрактограмма с поверхности образца из сплава ВТ6 в исходном состоянии



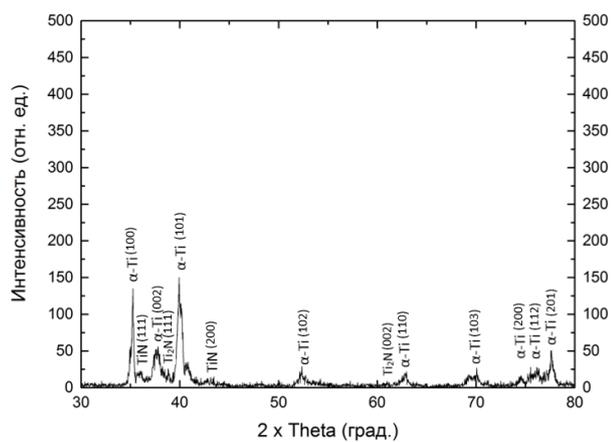
**Рис. 9.** Дифрактограмма с поверхности образца из сплава ВТ3-1 в исходном состоянии



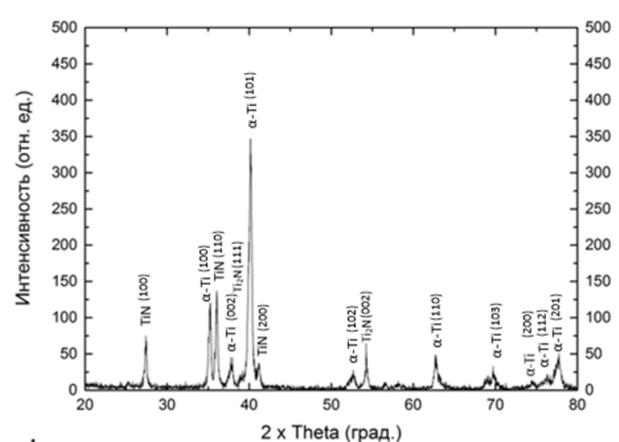
**Рис. 7.** Дифрактограмма с поверхности образца из сплава ВТ6 после азотирования в тлеющем разряде в течение 8 ч при температуре 800°C



**Рис. 10.** Дифрактограмма с поверхности образца из сплава ВТ3-1 после азотирования в тлеющем разряде в течение 8 ч при температуре 800°C



**Рис. 8.** Дифрактограмма с поверхности образца из сплава ВТ6 после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом в течение 8 ч при температуре 800°C



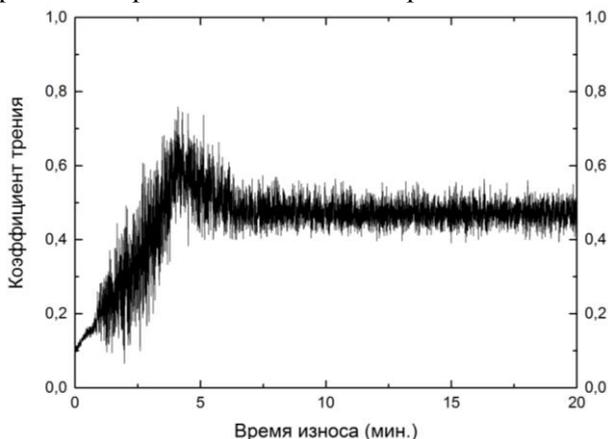
**Рис. 11.** Дифрактограмма с поверхности образца из сплава ВТ3-1 после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом в течение 8 ч при температуре 800°C

Анализ полученных дифрактограмм показал на формирование на поверхности нитридов титана различного стехиометрического состава ( $TiN$ ,  $Ti_2N$ ) как после традиционного ионного азотирования, так и после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом. При этом интенсивность рефлексов  $\alpha$ -фазы на дифрактограмме, полученной с поверхности образца, азотированного в тлеющем разряде с полым катодом, выше, что указывает на более высокое содержание азота вследствие того, что азот является  $\alpha$ -стабилизатором титана. Таким образом, прирост микротвердости поверхности после ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом достигается преимущественно за счет формирования не хрупких нитридных фаз, а более пластичного твердого раствора азота в  $\alpha$ -титане.

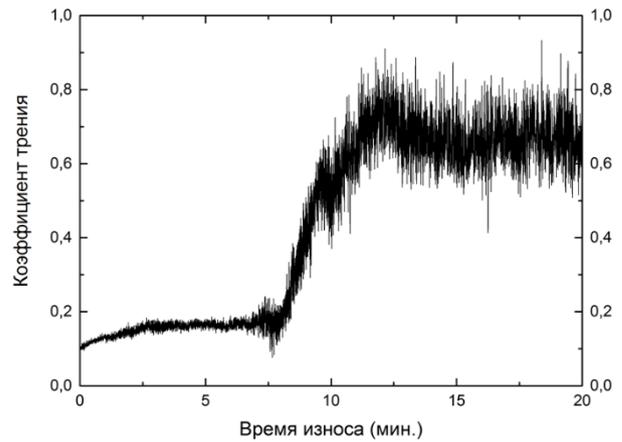
Испытания на износ проводились по стандартизованной схеме «шар–диск». В качестве контртела использовался шарик из стали ШХ15 диаметром 3 мм, нормальная нагрузка составила 4 Н, диаметр трека – 5 мм, скорость вращения – 500 об/мин.

Полученные в результате испытаний зависимости коэффициента трения от времени изнашивания образцов, представлены на рис. 12–15.

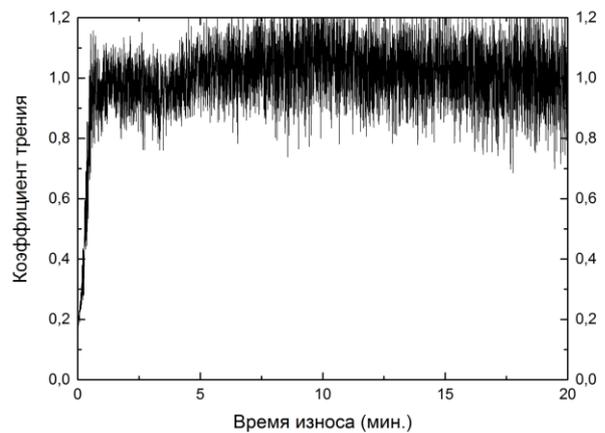
Анализ полученных зависимостей показал, что время приработки для образца из титанового сплава ВТ6, азотированного традиционным методом, составило менее 2 мин, а для образца, прошедшего обработку в тлеющем разряде с полым катодом – 7,5 мин. Таким образом, образец, азотированный в тлеющем разряде с полым катодом, эффективно сопротивлялся износу почти в 4 раза дольше. Использование тлеющего разряда с полым катодом для ионного азотирования образцов из титанового сплава ВТ3-1 привело к уменьшению среднего коэффициента трения в режиме нормального износа в 2 раза.



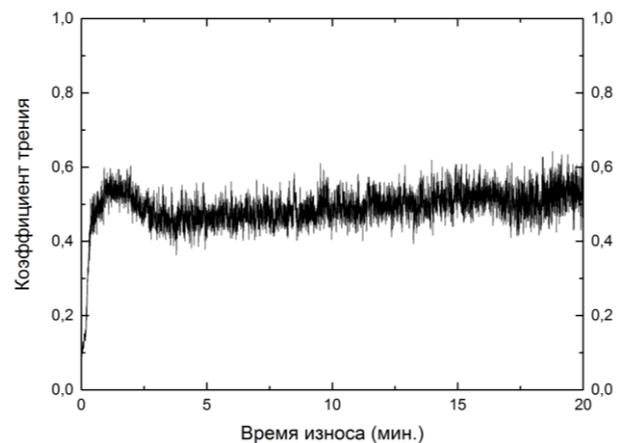
**Рис. 12.** Изменение коэффициента трения от продолжительности изнашивания образца из титанового сплава ВТ6 после ионного азотирования



**Рис. 13.** Изменение коэффициента трения от продолжительности изнашивания образца из титанового сплава ВТ6 после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом



**Рис. 14.** Изменение коэффициента трения от продолжительности изнашивания образца из титанового сплава ВТ3-1 после ионного азотирования



**Рис. 15.** Изменение коэффициента трения от продолжительности изнашивания образца из титанового сплава ВТ3-1 после азотирования в тлеющем разряде с полым катодом

В результате измерений профилей образцов с помощью контактного профилометра была определена средняя площадь поперечного сечения трека износа, и затем посчитан параметр износа для необработанных образцов, образцов, прошедших ионное азотирование, и образцов, азотированных в тлеющем разряде с полым катодом. Результаты расчетов приведены на рис. 16, 17.

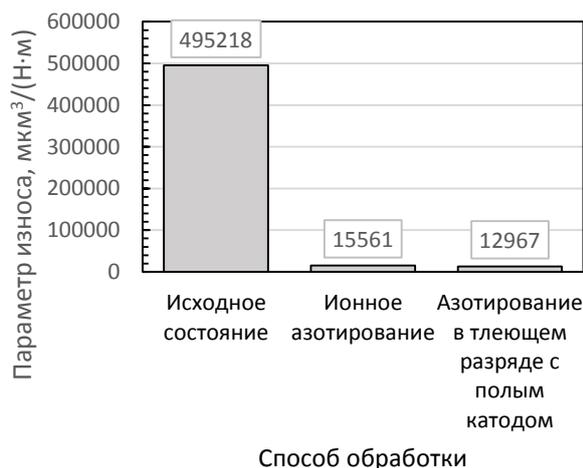


Рис. 16. Параметр износа образцов из сплава VT6

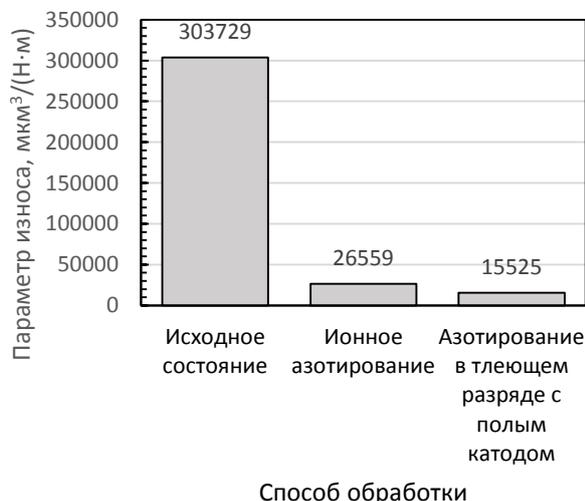


Рис. 17. Параметр износа образцов из сплава VT3-1

Таким образом было установлено, что образцы, прошедшие обработку в тлеющем разряде с полым катодом, сопротивляются износу эффективнее более чем в 10 раз по сравнению с образцами в исходном состоянии, и в 1,2–1,8 раза эффективнее по сравнению с образцами, прошедшими обычное ионное азотирование.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что азотирование титановых сплавов VT6, VT3-1 в тлеющем разряде с полым катодом ведет к образованию на поверхности нитридов титана различного стехиометрического состава ( $TiN$ ,  $Ti_2N$ ) и к увеличенному содержанию  $\alpha$ -фазы по сравнению с количеством  $\alpha$ -фазы, формирующимся после ионного азотирования. Модифицированный слой представлен на микроструктуре в виде светлого слоя, правно переходящего в микроструктуру основы, мелкозернистость которой сохраняется после обработки.

Установлено, что ионное азотирование титановых сплавов VT6, VT3-1 в тлеющем разряде с полым катодом в течение 8 ч при температуре  $800^\circ C$  ведет к увеличению микротвердости поверхности на 100–150  $HV_{0,1}$  и толщины упрочненного слоя в 2–3 раза по сравнению с соответствующими величинами после ионного азотирования.

Установлено, что образцы из титановых сплавов VT6, VT3-1, прошедшие азотирование в тлеющем разряде с полым катодом при температуре  $800^\circ C$  в течение 8 ч, сопротивляются износу эффективнее более, чем в 10 раз по сравнению с образцами в исходном состоянии, и в 1,2–1,8 раза эффективнее по сравнению с образцами, ионно-азотированными в тлеющем разряде.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цвиккер У. Титан и его сплавы / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. 512 с. [ U. Tzvikker, *Titanium alloys and its alloys. Trans. from German, (in Russian)*. Moscow: Metallurgiya, 1979. ]
2. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М: ВИЛС-МАТИ, 2009, 520 с. [ A. A. Ilyin, B. A. Kolachev, I. S. Polkin, *Titanium alloys. Composition, structure, properties. Reference (in Russian)*. Moscow: VILS-MATI, 2009. ]
3. Будилов В. В., Агзамов Р. Д., Рамазанов К. Н. Технология ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом // МИТОМ. 2007. № 7. С. 25–29. [ V. V. Budilov, R. D. Agzamov, K. N. Ramazanov, "Technology of ion nitriding in glow discharge with a hollow cathode" (in Russian), in *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, vol. 49, no. 7, pp. 25–29, 2007. ]
4. Ахмадеев Ю. Х., Иванов Ю. Ф., Коваль Н. Н. и др. Азотирование титана VT1-0 в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления в различных газовых средах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. №2. С.108–112. [ Yu. Kh. Akhmadeyev, Yu. F. Ivanov, N. N. Koval and others, "Nitriding of titanium VT1-0 in non-self low-pressure glow discharge in different gas environments" (in Russian), in *Poverkhnost. Rentgenovskiyе, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya*, no. 2, p. 108–112, 2008 ]

5. Лопатин И. В., Ахмадеев Ю. Х. Азотирование образцов титановых сплавов в плазме тлеющего разряда с полым катодом // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2011. Т. 22. № 5. С. 180–186. [ I. V. Lopatin, Yu. Kh. Akhmadeyev, "Nitriding of titanium alloys samples in plasma of glow discharge with hollow cathode" (in Russian), in *Nauchnye ведомosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Fizika*, vol. 22, no. 5, p. 180–186, 2011. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЗОЛОТОВ Илья Владимирович**, асп. каф. технол. машиностроения, дипл. инж. по машинам и технологиям высокоэффективн. процессов обработки материалов (УГАТУ, 2013). Готовит дисс. об азотировании титановых сплавов в тлеющем разряде с полым катодом.

**РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич**, доц. каф. технол. Машиностроения, дипл. инженер-технолог. производств (УГАТУ, 2004). Канд. техн. наук по вакуумным ионно-плазм. методам модифицирования поверхности. Иссл. высокотемпературное ионное азотирование конструкционных и инструментальных сталей в тлеющем разряде с полым катодом.

#### METADATA

**Title:** Influence of ion nitriding in glow discharge with hollow cathode on structure and properties of surface of VT6 and VT3-1 titanium alloys.

**Authors:** I. V. Zolotov<sup>1</sup>, K. N. Ramazanov, Yu. G. Khusainov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>zolotov.ugatu@gmail.com

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 2 (72), pp. 23-28, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** A method of intensification of process of ion nitriding of titanium alloys by creating a high density plasma in a glow discharge with the hollow cathode was offered. The influence of ion nitriding and nitriding in a glow discharge with the hollow cathode on the microstructure, phase composition, microhardness and wear resistance of surface layer of VT3-1 and VT6 titanium alloys samples was studied.

**Key words:** ion nitriding; VT6 and VT3-1 titanium alloys; glow discharge with hollow cathode.

**About authors:**

**ZOLOTOV, Ilya Vladimirovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Engineering technology. Dipl. engineer-technologist. (UGATU, 2013).

**RAMAZANOV, Kamil Nurullaevich**, Dept. of Engineering technology. Dipl. engineer-technologist (UGATU, 2004), cand. of Tech. Sci. (Tomsk, 2009).