https://doi.org/10.15350/17270529.2023.1.10

УДК 621.785.532

Ионно-плазменное азотирование алюминия

Н. А. Прошутин, П. Н. Крылов, Р. М. Закирова

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

Аннотация. Экспериментально исследовано ионно-плазменное азотирование алюминия в модернизированной установке УВН71-ПЗ. Целью данной работы являлся подбор оптимального режима ионно-плазменного азотирования алюминия. Были определены размеры областей когерентного рассеяния для дифракционного отражения от плоскости (111) и параметры решетки для азотированных образцов. Показано наличие модифицированного слоя на поверхности азотированных образцов. Выявлено влияние режима напряжения смещения на азотирование алюминия. Рентгенофазовый анализ не показал наличие нитрида алюминия. Микротвердость алюминия увеличилась при режиме азотирования на постоянном напряжении смещения.

Ключевые слова: азотирование, нитрид алюминия, несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом, импульсное напряжение смещения, постоянное напряжение смещения, рентгенофазовый анализ, микротвердость.

⊠ Николай Прошутин, e-mail: <u>proshutin729@gmail.com</u>

Ion-Plasma Nitriding of Aluminum

Nikolay A. Proshutin, Petr N. Krylov, Raushaniya M. Zakirova

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

Summary. The experimental study of ion-plasma nitriding of aluminum was carried out on an upgraded UVN71-P3 unit. The aim of the present work is to select the optimal mode of ion-plasma nitriding of aluminum. Aluminum alloy was used as modified material. The elemental composition of the initial aluminum alloy was determined by energy dispersive microanalysis. To achieve the goal, the following tasks were solved: to prepare aluminum samples (before nitriding); to nitride the surface layer of samples on the experimental UVN71-P3 unit; to study the structure and phase composition of the surface layer; to perform mechanical (to determine microhardness) tests of modified samples; to determine the optimum mode of the aluminum samples modification. Nitriding was carried out in 5 regimes; nitriding time was constant; voltage displacement frequency was changed. The microstructure of the material was studied by optical microscopy using a MII-4 microscope. The analysis of the phase composition, lattice period values and average sizes of the areas of coherent scattering of the surface layer were performed by X-ray diffraction on a diffractometer DRON-3. The mechanical tests such as the microhardness determination of the modified surface were carried out by the Vickers method on a PMT-3 device. During the test on microhardness a load of 0.098 N (10 g) was applied, the average of ten measurements was defined. The microhardness of an aluminum sample before nitriding was 40 kg/mm²; the sample nitrided at constant displacement had the microhardness value of 88 kg/mm²; the microhardness of samples nitrided at pulse displacement voltage practically did not change compared to original (not nitrided) aluminum. The lattice parameters of the samples were determined by the extrapolation method. The dimensions of coherent scattering regions for diffraction reflection from the plane (111) were estimated using the Selyakov-Scherrer formula. The size of the DCD depends on the displacement frequency; it increases for the samples nitrided at 15, 20, and 27 Hz and decreases at 5 and 30 Hz. The lattice parameter a in all the nitrided samples is increased compared to the initial one. The presence of a modified layer on the surface of the nitrided samples is observed. The effect of the bias voltage regime on the nitriding of aluminum is revealed. The X-ray phase analysis shows no presence of aluminum nitride. The microhardness of aluminum increases when the nitriding mode at constant bias voltage is used.

Keywords: nitriding, aluminum nitride, independent glow discharge with hollow cathode, pulse bias voltage, DC bias voltage, X-ray phase analysis, microhardness.

Nikolay Proshutin, e-mail: <u>proshutin729@gmail.ru</u>

введение

Улучшение эксплуатационных свойств различных изделий в настоящее время является одной из важнейших задач, решаемой при изготовлении деталей различного назначения. Одним из способов решения данной задачи является создание материалов с особыми свойствами поверхностного слоя [1-3]. Для модифицирования поверхностных слоев широкое распространение получили ионно-плазменные методы.

Алюминий и его сплавы используются в различных областях промышленности благодаря таким характеристикам, как малый вес, дешевизна материала и податливость обработке. Но такие детали имеют невысокие трибологические и механические характеристики, улучшить которые можно созданием упрочненного поверхностного слоя, например, имплантацией азота (азотирование). Поверхность алюминия и его сплавов, как правило, покрыта оксидами, и для обеспечения надежного поступления азота на обрабатываемую поверхность необходима эффективная очистка поверхности в процессе азотирования. Это вызывает необходимость интенсифицировать процесс ионной очистки в процессе азотирования или непосредственно перед ней.

Ещё одной проблемой является образование диэлектрической пленки нитрида алюминия, которая препятствует проникновению азота вглубь образца и затрудняет подачу потенциала на обрабатываемое изделие. Также возможен электрический пробой пленки нитрида алюминия и появление катодного пятна. Чтобы избежать этого результата, ряд авторов применяют импульсные методы азотирования [10 – 11], позволяющие заряду ионов на поверхности пленки оксида или нитрида алюминия восполняться электронами из плазмы в промежутке между импульсами.

Для того чтобы сформировать азотсодержащую плазму в крупных $(0.1 - 1 \text{ м}^3)$ вакуумных объемах в основном применяют тлеющий разряд [4, 5]. Главным минусом тлеющего разряда считается сравнительно большие (10 - 100 Па) давление рабочего газа и напряжение горения (600 – 700 В) [6]. В таких условиях ионы, попадающие на катод (обрабатываемое изделие), утрачивают значительную долю своей энергии из-за неоднократных столкновений в катодном слое, что приводит к малой результативности очистки поверхности алюминия от окисного слоя, который мешает диффузии азота и тормозит процесс азотирования. В связи с чем, вызывает интерес применение дугового разряда с осцилляцией электронов [7 - 9], т.е. несамостоятельный дуговой разряд с полым катодом.

Целью данной работы являлся подбор оптимального режима ионно-плазменного азотирования алюминия на модифицированной установке УВН71-П3.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Процесс азотирования осуществляли на модернизированной установке УВН71-П3, состоящей из вакуумного агрегата УВН71-П3 с блоком управления АВ2107 фирмы АВАКС, схема внутрикамерной оснастки модернизированной УВН71-П3 представлена на рис. 1.

Вверху рабочей камеры (1) установлен плазменный источник с накальным полым катодом (ПИНК) (3). Вольфрамовые нити накала (4) смонтированы на водоохлаждаемых медных токовводах (8) на фланце (7) через изоляторы. Витоновое вакуумное уплотнение (6) служит изолятором фланца плазменного источника от корпуса установки. На нити накала через ЛАТР (линейный автотрансформатор) и понижающий трансформатор подается напряжение 15 В с током 90 А. Нити накала гальванически развязаны от корпуса. На рабочем столике (2) смонтирован трубчатый нагреватель (10) образцов (9). Рабочая температура фиксируется термопарой (11). Для предотвращения нагрева рабочей камеры установлен дополнительный экран на всей камере.

Плазменный источник помещен в соленоид (5). Питание соленоида осуществляется блоком постоянного тока БП.НР-25.007 с регулируемым напряжением 0 – 24 В и мощностью 750 Вт. Это обеспечивает индукцию магнитного поля внутри источника плазмы 0.04 Тл.



Рис. 1. Схема внутрикамерной оснастки установки ионно плазменного азотирования

Fig. 1. Diagram of the in-chamber equipment of the ion plasma nitriding unit

ПИНК предназначен для создания плотной однородной неравновесной плазмы в больших вакуумных объемах. Перед азотированием предварительно инициировали газоразрядную плазму на основе аргона в качестве очистки образцов. После откачки вакуумной камеры до предельного давления 10⁻⁵ мм рт.ст., в камеру через фланец ПИНК напускается азот, после чего подается напряжение на накаливаемые нити. Электроны, эмитируемые накаленным катодом, увеличивают траекторию движения в магнитном поле, эффективно ионизируют рабочий газ и создают газоразрядную плазму в полом катоде. Ионы, ускоренные в прикатодном падении потенциала, выбивают вторичные электроны со стенок полого катода, усиливая ионизационные процессы в полости, и создают условия для зажигания и функционирования сильноточного газового разряда при низких давлениях и напряжениях разряда [12]. Питание плазменного источника осуществляется модернизированным выпрямительным агрегатом ВАС-600. Фланец плазменного источника является катодом, а анодом - корпус. При подаче напряжения между анодом и катодом плазма загорается внутри всей вакуумной камеры.

Внешне разряд представляет собой свечение вблизи полого катода и в объеме рабочей камеры, камера ярко освещена накаленным катодом. Чем ближе к катоду, тем плотнее свечение. Рассматриваемый дуговой разряд является несамостоятельным, поэтому накаленный катод играет ключевую роль в поддержании разряда. В качестве катода применялась вольфрамовая проволока диаметром 1 мм. На рабочий столик с образцами подается смещение со знаком "минус" или импульсное с частотой 0 – 35 Гц и напряжением 0 – 1000 В от модулятора МТ-42.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для модификации поверхности ионно-плазменным азотированием использовали сплав алюминия (далее просто алюминий). Элементный состав исходного сплава алюминия был определён с помощью энергодисперсионного микроанализа (рис. 2). Результат представлен в табл. 1.

		-		
Элемент	Весовой %	Атом. %	Полн. инт.	% ошибок
Element	Weight %	Atom. %	Full int.	% errors
СК	0.42	0.91	0.60	71.55
ОК	9.20	15.01	66.00	9.15
MgK	1.48	1.59	33.77	5.66
AlK	81.45	78.85	1949.21	2.94
SiK	0.71	0.66	7.39	11.62
CrK	1.26	0.63	10.98	12.74
MnK	0.83	0.39	6.28	16.36
FeK	0.75	0.35	5.10	20.24
CuK	3.91	1.61	16.62	7.27

Таблица 1. Элементный состав исходного алюминия



Table 1. Elemental composition of initial aluminum



Из микроспектрального анализа видно, что исходные образцы являются алюминиевомедными. Согласно [13] Al-Cu сплав должен содержать 4 – 5 % Cu, что наблюдается в нашем случае. Алюминиево-медные сплавы легируют марганцем, кремнием, железом и магнием. Последний оказывает наибольшее влияние: повышает предел текучести и прочности. Добавление железа повышает жаропрочность сплава, кремния – способность к искусственному старению. Такие сплавы имеют низкую коррозионную стойкость.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Подготовить образцы алюминия (до азотирования).

2. Азотировать поверхностный слой образцов.

3. Исследовать структуру и фазовый состав поверхностного слоя.

4. Выполнить механические (определить микротвердость) испытания модифицированных образцов.

5. Выявить оптимальный режим модифицирования образцов алюминия.

В качестве образцов были подготовлены брусочки алюминия размерами 10×5×15 мм. Для этого произвели вырезку брусочков необходимого размера и подготовку поверхности: шлифование, полирование, травление. Механическую обработку проводили на шлифовальнополировальном станке Полилаб. После этого все образцы подвергались травлению. Травление происходило по стандартной методике в концентрированной азотной кислоте HNO₃ и разбавленном растворе 5 – 20 % NaOH. Погружение образца в NaOH длилось 1 мин., в HNO₃ – 30 с. После проведения процедуры каждый образец промывался в холодной воде. Процесс азотирования осуществлялся на модернизированной установке УВН71-П3. Азотированию подвергали верхнюю и две боковые стороны.

Предварительно образцы алюминия подвергались чистке в ультразвуковой ванне со спиртом. Образцы устанавливали на вращающийся столик установки УВН71-П3. Рабочая вакуумная камера откачивалась паромасляным насосом до предельного давления 4.8 · 10⁻³ Па. В качестве плазмообразующего газа использовался азот. Ионно-плазменное азотирование проводили при 500 °C. Температуру измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары, укрепленной на держателе образцов. После завершения азотирования ПИНК выключался, перекрывалась подача азота в камеру, и образцы остывали до комнатной температуры в высоком вакууме.

Азотирование проводилось в 5 режимах, время азотирования было постоянным 8 ч, в процессе азотирования образцов изменялась частота смещения напряжения $f(\Gamma \mu)$. Режимы азотирования при импульсном и постоянном (0 Г μ) напряжении смещения представлены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы азотирования для алюминиевых образцов

Nº	P _{ult,} Pa	$P_{\rm Ar,}$	P _{N2,} Pa	<i>Т</i> , °С	Накал ионного источника Ignition of an ion source		Питание разряда Discharge power		Смещение Offset	
				C C	<i>U</i> , V	<i>I</i> , A	<i>U</i> , V	<i>I</i> , A	<i>U</i> , V	<i>f</i> , Hz
1										0
2										5
3	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-1}$	3.10-1	500	15	90	50	40	400	15
4	4.0 10	5 10	5 10	500	15	50	50	10	400	20
5										27
6										30

Table 2. Nitriding modes for aluminum samples

 P_{ult} – предельное давление в камере / pressure limit in the chamber;

 $P_{\rm Ar}$ – рабочее давление аргона в камере для очистки / operating pressure of argon in the purging chamber;

 P_{N2} – рабочее давление азота в камере для азотирования / operating pressure of nitrogen in the nitriding chamber.

Проведены исследования микроструктуры материала методом оптической микроскопии (микроскоп МИИ-4). Измерение толщины модифицированного слоя проводили с использованием объект-микрометра и программы ImageJ.

Механические испытания модифицированной поверхности осуществляли, определяя микротвердость методом Виккерса (прибор ПМТ-3). При испытании на микротвердость применяли нагрузку 0.098 Н (10 г). Величину микротвердости определяли как среднее из десяти замеров. При малых размерах квадратного отпечатка (диагональ < 10 мкм) погрешность определения твердости при увеличении 500 раз оптической системы прибора ПМТ-3 может достигать 20 %.

Анализ фазового состава, значения периода решетки и средние размеры областей когерентного рассеяния поверхностного слоя выполняли методом дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр ДРОН-3). Были получены дифрактограммы в Fe-K α излучении (длина волны $\lambda = 1.9373$ Å) в диапазоне брэгговских углов 30 – 150° с шагом сканирования 0.1° и временем набора импульсов 10 с. Фазовый анализ проводили по стандартной методике [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура алюминия после азотирования

Микроскопический анализ азотированных образцов алюминия заключался в исследовании структуры специально подготовленных образцов (микрошлифов) при увеличениях свыше 50 крат. На рис. 3 представлены изображения микроструктуры исходного и азотированных образцов.



Рис. 3. Снимки микроструктуры образцов (увеличение 250×): *a*) – до азотирования, *b*) – после азотирования Fig. 3. Microstructure images of samples (magnification 250×): a) – before nitriding, b) – after nitriding

Из анализа микроструктуры образцов алюминия до и после азотирования, можно сказать, что микроструктура поверхности алюминия изменилась, увеличился размер зерна.

Исследование глубины азотированного слоя

Для того чтобы получить снимки микроструктуры образцов алюминия после азотирования потребовалось снять поверхностный слой с боковой (модифицированной) стороны на глубину ~ 1 мм. Такая толщина снятия вызвана необходимой уверенностью от избавления модифицированного слоя. Образцы были повторно подвергнуты механической обработке, которая состояла из шлифовки и полировки. Стоит заранее отметить, что такая мера (снятие модифицированного слоя на поверхности) служила не только для рассмотрения структуры образца после азотирования, но и в большем итоге для измерения толщины модифицированного слоя.

Оптическим методом определена глубина азотированного слоя исследуемых образцов алюминия (рис. 4). Для этого проводили съемку боковой поверхности образца.



Рис. 4. Снимки боковых поверхностей азотированных образцов с разной частотой смещения напряжения *f* (Гц): *a*) – 0, *b*) – 20

Fig. 4. Images of the side surfaces of nitrided samples with different voltage offset frequency f(Hz): a) – 0, b) – 20

Анализ изображений боковой поверхности алюминия показал наличие измененного слоя, т.е. в приповерхностном слое произошло некоторое изменение в структуре. Однако, судя по виду измененного слоя, нитридов алюминия не наблюдается. Но можно сказать о появлении модифицированного слоя, который возник в образце и имеет определенную толщину (его можно увидеть благодаря характерному свечению).

Модифицированный слой алюминия получился неоднородным (рис. 4, *b*). Значения толщины модифицированного слоя составили 14 – 48 мкм.

Определение микротвердости

Были определены значения микротвердости *Н* для исходного образца (до азотирования) и образцов, подвергнутых ионно-плазменному азотированию (рис. 5).

Согласно литературным данным [13] микротвердость алюминия составляет 25.6 – 77.3 кг/мм², азотированного алюминия – 80.5 – 700 кг/мм².



Рис. 5. Зависимость микротвердости Н от частоты смещения напряжения f

Fig. 5. The dependence of the microhardness H on the frequency of the voltage shift f

Микротвердость образца алюминия до азотирования составила 40 кг/мм². Образец, азотированный при постоянном смещении, имел значение микротвердости – 88 кг/мм². Микротвердость образцов, азотированных при импульсном напряжении смещения, практически не изменилась по сравнению с исходным (не азотированным) алюминием.

Рентгенофазовый анализ

Дифрактограммы образцов алюминия после азотирования представлены на рис. 6. Фазовый анализ показал наличие только алюминия, нитридов алюминия выявлено не было.





Fig. 6. Diffractograms of samples after nitriding. The values to the right of the graph mean: 1 - 0 Hz, 2 - 5 Hz, 3 - 15 Hz, 4 - 20 Hz, 5 - 27 Hz, 6 - 30 Hz Методом экстраполяции были определены параметры решетки алюминия, результаты представлены в табл. 3. Параметр решетки *а* алюминия исходного образца (до азотирования) – 4.058 Å. В результате азотирования параметр решетки алюминия незначительно увеличился.

Используя формулу Селякова-Шеррера, оценили размеры областей когерентного рассеяния *<D>* для дифракционного отражения от плоскости (111). Результаты приведены в табл. 3.

<i>f</i> , Hz	Phase	<i>a</i> , Å	< D>, Å
0	Al	4.061	580
5	Al	4.062	530
15	Al	4.062	677
20	Al	4.062	677
27	Al	4.062	677
30	Al	4.062	554

Таблица 3. Результаты рентгенофазового анализа

Table 3. Results of X-ray phase analysis

Средние размеры ОКР зависят от частоты смещения. Для образца, который азотировали при постоянном смещении, размеры ОКР составили 580 Å. При 5 Гц получилось минимальное значение 530 Å. Далее при частотах 15, 20, 27 Гц размеры ОКР оставались постоянными 677 Å. При частоте 30 Гц снова уменьшились до 554 Å.

Таким образом, фазовый состав исследуемых образцов алюминия в результате ионноплазменного азотирования не изменился. Параметр решетки *a* у всех азотированных образцов по сравнению с исходным увеличился. Скорей всего это связано с появлением растягивающих макронапряжений, что вполне могло оказать влияние на микротвердость. Размеры областей когерентного рассеяния увеличились для образцов, азотированных при частотах 15, 20, 27 Гц и уменьшились при 5 и 30 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана принципиальная возможность ионно-плазменного азотирования алюминия в плазме тлеющего разряда на модернизированной установке УВН 71-ПЗ. На поверхности азотированных образцов обнаружен модифицированный слой.

Методом рентгенофазового анализа обнаружена только фаза алюминия.

Микротвердость алюминия после азотирования при постоянном смещении увеличилась до 88 кг/мм², а при импульсном смещении микротвердость азотированного алюминия осталась на уровне исходного образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю. М., Арзамасов В. Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1984. 256 с.

2. Берлин Е. Б., Сейдман Л. А., Коваль Н. Н. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М.: Техносфера, 2012. 464 с.

3. Кадыржанов К. К., Комаров Ф. Ф., Погребняк А. Д., Русаков В. С., Туркебаев Т. Э. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. М.: Изд-во МГУ, 2005. 640 с.

4. Panajoti T. A. Creation of gaseous medium with ultimate saturating power under ion nitriding of the alloys // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 4. С. 70-78.

REFERENCES

1. Lakhtin Yu. M., Arzamasov V. N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical-thermal treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1984. 256 p.

2. Berlin E. B., Seydman L. A., Koval' N. N. *Plazmennaya khimiko-termicheskaya obrabotka poverkhnosti stal'nykh detaley* [Plasma chemical-thermal treatment of steel parts]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2012. 464 p.

3. Kadyrzhanov K. K., Komarov F. F., Pogrebnyak A. D., Rusakov V. S., Turkebaev T. E. *Ionno-luchevaya i ionnoplazmennaya modifikatsiya materialov* [Ion-beam and ion-plasma modification of materials]. Moscow: MGU Publ., 2005. 640 p.

4. Panajoti T. A. Creation of gaseous medium with ultimate saturating power under ion nitriding of the alloys. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2003, no. 4, pp. 70-78.

XIV Всероссийская школа-конференция молодых учёных с международным участием "КоМУ-2022"

5. Shchanin P. M., Koval' N. N., Goncharenko I. M., Grigor'ev S. V. Structural steels nitriding in low-pressure gas discharge // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 3. С. 16-19.

6. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г. И., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.

7. Будилов В. В., Агзамов Р. Д., Рамазанов К. Н. Ионное азотирование в тлеющем разряде с эффектом полого катода // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 7(625). С. 33-36.

8. Метель А. С., Григорьев С. Н., Мельник Ю. А., Панин В. В. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда // Физика плазмы. 2009. Т. 35, № 12. С. 1140-1149.

9. Ахмадеев Ю. Х., Иванов Ю. Ф., Коваль Н. Н. Лопатин И. В., Щанин П. М. Азотирование титана ВТ1-0 в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления в различных газовых средах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. № 2. С. 108-112.

10. Khan N., Shah M. S., Ahmad R. Nitriding of aluminium alloy in nitrogen and nitrogen-helium mixture using 100 Hz-pulsed DC glow discharge // Plasma Science and Technology, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 452-460. https://doi.org/10.1088/1009-0630/12/4/14

11. 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. С. 62-67.

12. Гончаренко И. М., Иванов Ю. Ф., Григорьев С. В., Коваль Н. Н., Щанин П. М., Янг Си-Зе. Закономерности формирования зоны диффузионного насыщения при азотировании стали в плазме газового разряда // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № S1-2. С. 201-204.

13. Беляев А. И., Бочвар О. С., Буйнов Н. Н. Металловедение алюминия и его сплавов. М: Металлургия. 1983. 279 с.

14. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 357 с.

5. Shchanin P. M., Koval' N. N., Goncharenko I. M., Grigor'ev S. V. Structural steels nitriding in low-pressure gas discharge. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2001, no. 3, pp. 16-19.

6. Lakhtin Yu. M., Kogan Ya. D., Shpis G. I., Bemer Z. *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya* [Nitriding Theory and Technology]. Moscow: Metallurgy Publ., 1991. 320 p.

7. Budilov V. V., Agzamov R. D., Ramazanov K. N. Ion nitriding in glow discharge with hollow cathode effect. *Metal Science and Heat Treatment*, 2007, vol. 49, no. 7-8. pp. 358-361. https://doi.org/10.1007/s11041-007-0065-y

8. Metel A. S., Grigoriev S. N., Melnik Yu. A., Panin V. V. Filling the vacuum chamber of a technological system with homogeneous plasma using a stationary glow discharge. *Plasma Physics Reports*, 2009, vol. 35, no. 12, pp. 1058-1067. https://doi.org/10.1134/S1063780X09120095

9. Akhmadeev Yu. Kh., Ivanov Yu. F., Koval' N. N., Lopatin I. V., Shchanin P. M. Nitriding of VT1-0 titanium in low-pressure non-self-maintained glow discharge with the use of different gas mixtures. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 166-170. <u>https://doi.org/10.1007/s11700-008-1026-9</u>

10. Khan N., Shah M. S., Ahmad R. Nitriding of aluminium alloy in nitrogen and nitrogen-helium mixture using 100 Hz-pulsed DC glow discharge. *Plasma Science and Technology*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 452-460. https://doi.org/10.1088/1009-0630/12/4/14

11. Koval N. N, Schanin P. M., Akhmadeev Yu. Kh., Lopatin I. V., Kolobov Yu. R., Vershinin D. S., Smolyakova M. Yu. Influence of the composition of a plasmaforming gas on nitriding in a non-self-maintained glow discharge with a large hollow cathode. *Journal of Surface Investigation*. *X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2012, vol. 6, pp. 154-158. <u>https://doi.org/10.1134/S1027451012020115</u>

12. Goncharenko I. M., Ivanov Yu. F., Grigor'ev S. V., Koval' N. N., Shchanin P. M., Yang Si-Ze. Zakonomernosti formirovaniya zony diffuzionnogo nasyshcheniya pri azotirovanii stali v plazme gazovogo razryada [Regularities of the formation of diffusion saturation zone during nitriding of steel in a gas discharge plasma]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2004, vol. 7, no. S1-2, pp. 201-204. (In Russian).

13. Belyaev A. I., Bochvar O. S., Buynov N. N. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of Aluminum and its Alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1983. 279 p.

14. Gorelik S. S., Skakov Yu. A., Rastorguev L. N. *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow: MISIS Publ., 2002. 357 p.

Поступила 20.01.2023; после доработки 27.01.2023; принята к опубликованию 10.02.2023 Received January 20, 2023; received in revised form January 27, 2023; accepted February 10, 2023

Информация об авторах

Прошутин Николай Алексеевич, инженер, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: <u>proshutin729@gmail.com</u>

Крылов Петр Николаевич, кандидат физикоматематических наук, профессор кафедры, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Закирова Раушания Мазитовна, кандидат физикоматематических наук, доцент, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Information about the author

Nikolay A. Proshutin, Engineer, Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: proshutin729@gmail.com

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

Raushaniya M. Zakirova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation