



УДК 621.785.53; 539.25

DOI 10.17073/0368-0797-2024-4-391-397

Оригинальная статья  
Original article

## КОМПЛЕКСНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Ю. Ф. Иванов<sup>✉</sup>, Е. А. Петрикова, А. Д. Тересов,  
И. В. Лопатин, О. С. Толкачев

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, Академический пр., 2/3)

✉ yufi55@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена выявлению и анализу закономерностей изменения элементного и фазового составов, дефектной субструктуры, механических (микротвердость) и трибологических (износостойкость и коэффициент трения) свойств нержавеющей высокохромистой стали, подвергнутой комплексной обработке, которая сочетает облучение в вакууме поверхностного слоя образцов интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия и последующее азотирование в условиях элионного нагрева образцов. В качестве материала исследования используется высокохромистая сталь 20X23N18, являющаяся в исходном состоянии поликристаллическим агрегатом на основе  $\gamma$ -железа. Облучение стали импульсным электронным пучком авторы проводили на установке «СОЛО», оснащенной электронным источником с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы. Азотирование стали осуществлялось на установке «ТРИО» с размерами камеры 600×600×600 мм, дооснащенной блоком коммутации для реализации элионного (электронного и ионного) режима обработки. Азотирование проводили при температурах 723, 793 и 873 К в течение 1, 3 и 5 ч. Элионное азотирование при температурах 723 и 793 К в течение 3 ч образцов, предварительно облученных электронным пучком (при режиме 10 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.), сопровождается формированием керамического слоя, содержащего только нитриды железа и хрома. Наиболее высокие значения износостойкости стали после элионного азотирования, превышающие износостойкость исходной стали более чем в 700 раз, наблюдаются при параметрах азотирования 793 К, 3 ч.

**Ключевые слова:** высокохромистая сталь, комплексная обработка, облучение импульсным электронным пучком, азотирование, структура, фазовый состав, твердость, износостойкость, коэффициент трения

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRM-2021-0006). Результаты ПЭМ-анализа получены на базе Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» НИ ТПУ.

**Для цитирования:** Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Лопатин И.В., Толкачев О.С. Комплексная электронно-ионно-плазменная модификация поверхности нержавеющей высоколегированной стали. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(4):391–397. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-391-397>

## COMPLEX ELECTRON-ION-PLASMA SURFACE MODIFICATION OF HIGH-ALLOY STAINLESS STEEL

Yu. F. Ivanov<sup>✉</sup>, E. A. Petrikova, A. D. Teresov,  
I. V. Lopatin, O. S. Tolkachev

Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ yufi55@mail.ru

**Abstract.** The work is devoted to identification and analysis of patterns of change in the elemental and phase composition, defective substructure, mechanical (microhardness) and tribological (wear resistance and friction coefficient) properties of stainless high-chromium steel subjected to complex processing, combining vacuum irradiation of the samples surface layer with an intense pulsed electron beam of submillisecond exposure duration and subsequent nitriding under electron-ionic heating conditions. High-chromium steel AISI 310S, which in the initial state is a polycrystalline aggregate

based on  $\gamma$ -iron, was used as the research material. Pulsed electron beam treatment of steel was carried out on a “SOLO” installation equipped with an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure pulsed arc discharge with grid stabilization of the cathode plasma boundary and an open anode plasma boundary. Steel nitriding was carried out on a “TRIO” installation with a chamber size of 600×600×600 mm, equipped with a switching unit to implement the electron-ionic processing mode. Nitriding was carried out at 723, 793, and 873 K temperatures for 1, 3 and 5 h. It was found that electron-ionic nitriding of the samples pre-irradiated with an electron beam (10 J/cm<sup>2</sup>, 200  $\mu$ s, 3 pulses at 723 and 793 K for 3 h) is accompanied by the formation of a ceramic layer containing only iron and chromium nitrides. The highest values of steel wear resistance after electron-ionic nitriding, exceeding the wear resistance of the initial steel by more than 700 times, are observed at nitriding parameters of 793 K, 3 h.

**Keywords:** high-chromium steel, complex processing, pulsed electron beam treatment, nitriding, structure, phase composition, hardness, wear resistance, friction coefficient

**Acknowledgements:** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRM-2021-0006). The results of the TEM analysis were obtained on the basis of the Scientific and Educational Innovation Center “Nanomaterials and Nanotechnology” of the TPU Research Institute.

**For citation:** Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Teresov A.D., Lopatin I.V., Tolkachev O.S. Complex electron-ion-plasma surface modification of high-alloy stainless steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):391–397. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-391-397>

## ВВЕДЕНИЕ

Результаты последних исследований выявили востребованность модификации поверхности металлов и сплавов путем комплексной обработки, сочетающей в различной последовательности насыщение поверхностного слоя атомами газовых элементов, напыление тонких пленок различных металлов с последующим перемешиванием под действием высокоэнергетических импульсных электронных пучков, нанесение твердых и сверхтвердых износостойких покрытий и т.д. [1; 2]. Следствием такой обработки является градиентная структура в приповерхностном слое с плавным изменением концентрации легирующих элементов по глубине, что позволяет значительно повысить твердость и износостойкость, коррозионную стойкость и электропроводность (и т.д.) поверхности [3 – 5]. Наиболее распространенным в промышленности ионно-плазменным методом азотирования является метод азотирования в аномальном тлеющем разряде [6 – 8], основным недостатком которого является сравнительно высокое рабочее давление, что не позволяет проводить эффективную ионную очистку поверхности обрабатываемой детали в процессе азотирования. С целью преодоления данного недостатка в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН был разработан и успешно используется в течение четверти века плазмогенератор «ПИНК» [9 – 11]. Необходимая для процесса азотирования температура изделий при использовании плазмогенератора «ПИНК» поддерживается за счет потока ионов из плазмы разряда, ускоряемых до энергии, определяемой величиной электрического смещения на образцах. Весьма часто это приводит к интенсивному ионному растравливанию обрабатываемой поверхности и существенному увеличению ее шероховатости [12; 13]. Для снижения влияния фактора интенсивности ионного воздействия на формирование модифицированного слоя в работах [14; 15] было предложено использовать для подогрева обрабатываемых образцов электронную компоненту плазмы, реализуя элионный процесс обработки, который обеспечивает

возможность изменения температуры обработки образцов без существенного изменения интенсивности их ионной бомбардировки.

Целью настоящей работы является установление закономерностей эволюции структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой комплексному воздействию, сочетающему облучение импульсным электронным пучком и последующее элионное азотирование в плазме газового разряда низкого давления.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использовали высокохромистую сталь марки 20X23H18 (зарубежный аналог AISI 310S) (состав, мас. %: С 0,2; Si 1; Mn 2; Ni 17 – 20; Cr 22 – 25; S 0,02; P 0,035; остальное – Fe). Образцы имели форму пластинок размерами 10×10×5 мм. Облучение стали импульсным электронным пучком проводили на установке «СОЛО», оснащенной электронным источником с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы [17; 18]. Опираясь на результаты тепловых расчетов, выбрали плотность энергии пучка электронов ( $E_s$ ) 10 и 30 Дж/см<sup>2</sup> (длительность импульса 200 мкс; количество импульсов 3 имп.; частота 0,3 с<sup>-1</sup>). При плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см<sup>2</sup> (200 мкс, 3 имп.) реализуется твердофазный режим воздействия, то есть превращения в поверхностном слое стали марки 20X23H18 протекают в пределах температурного интервала существования поверхностного слоя образца в твердом состоянии. При плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup> (200 мкс, 3 имп.) реализуется жидкофазный режим воздействия, то есть превращения в поверхностном слое стали 20X23H18 протекают в пределах температурного интервала существования поверхностного слоя образца в расплавленном состоянии. Азотирование стали проводилось на установке «ТРИО» с размерами камеры 600×600×600 мм, дооснащенной блоком

коммутации для реализации элионного (электронного и ионного) режима обработки [15], при температурах 723 – 873 К в течение 1 – 5 ч. Температура образцов регулировалась коэффициентом заполнения электронной фазы. Образцы закреплялись на неподвижном держателе в центре камеры на оси источников плазмы таким образом, чтобы держатель находился под углом 60° к каждому из них, а образцы находились на лицевой стороне держателя. Температура процесса измерялась хромель-алюмелевой термопарой, закрепленной через кварцевый стаканчик в держателе образцов.

Исследования структуры, элементного и фазового составов модифицированной стали осуществляли методами рентгенофазового анализа, оптической, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Механические свойства стали характеризовались микротвердостью (нагрузка на индентор 0,5 Н); трибологические – износостойкостью и коэффициентом трения. Параметры трибологических испытаний в условиях сухого трения при комнатной температуре: контртело – шарик диаметром 6 мм из карбида кремния SiC, диаметр трека износа 4 мм, нагрузка 5 Н, длина пути трения 2000 м.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

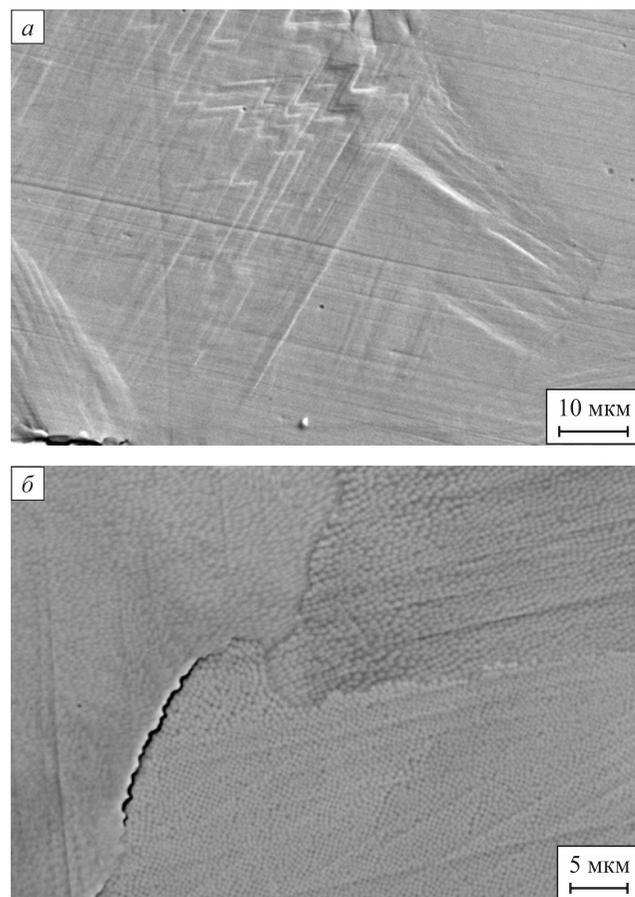
Обработка поверхности нержавеющей стали марки 20Х23Н18 импульсным электронным пучком при  $E_s = 10 \text{ Дж/см}^2$  (200 мкс, 3 имп.) сопровождается формированием на поверхности облучения следов скольжения (рис. 1, а), что указывает на интенсивную деформацию поверхностного слоя стали в результате релаксации упругих напряжений, формирующихся в поверхностном слое образцов в результате скоростного процесса ввода энергии и охлаждения. Поверхность образцов остается гладкой, микротрещины, микрократеры и микропоры на поверхности облучения не обнаруживаются. Последнее свидетельствует о том, что облучение стали не приводит к плавлению поверхностного слоя образцов.

Обработка поверхности нержавеющей стали 20Х23Н18 импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов  $30 \text{ Дж/см}^2$  (200 мкс, 3 имп.) сопровождается формированием на поверхности облучения высокорельефной структуры, характеризующейся наличием большого количества микрократеров. В объеме зерен наблюдается структура ячеистого типа, что свидетельствует о плавлении и последующей высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя материала (рис. 1, б). Следовательно, при данном режиме облучения реализуется процесс высокоскоростного плавления поверхностного слоя стали, что хорошо согласуется с результатами расчета температурного поля. Размер ячеек кристаллизации изменяется в пределах от 330 до 500 нм. Следует отметить присутствие на поверхности стали микротрещин, рас-

положенных вдоль границ зерен. Последнее указывает на высокий уровень остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое образцов в результате высокоскоростного охлаждения.

Установлено, что увеличение плотности энергии пучка электронов приводит к росту коэффициента износа (снижению износостойкости) стали от  $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  при  $10 \text{ Дж/см}^2$  до  $5,2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  при  $30 \text{ Дж/см}^2$ . Коэффициент износа стали до облучения импульсным электронным пучком составляет  $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ . Показано, что микротвердость образцов увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов от 1,7 ГПа в исходном состоянии до 2,4 ГПа после облучения при  $30 \text{ Дж/см}^2$ .

Последующее азотирование стали привело к многократному (в 4 – 9 раз относительно исходного состояния) увеличению твердости поверхностного слоя. Твердость стали снижается с ростом температуры азотирования и увеличением плотности энергии пучка



**Рис. 1.** Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образцов стали 20Х23Н18, облученной импульсным электронным пучком:  
 а –  $E_s = 10 \text{ Дж/см}^2$  (200 мкс, 3 имп.);  
 б –  $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$  (200 мкс, 3 имп.)

**Fig. 1.** Electron microscopic image of the surface structure of AISI 310S steel samples irradiated with a pulsed electron beam:  
 а –  $E_s = 10 \text{ J/cm}^2$  (200  $\mu\text{s}$ , 3 pulses);  
 б –  $E_s = 30 \text{ J/cm}^2$  (200  $\mu\text{s}$ , 3 pulses)

электронов. Максимальная толщина упрочненного слоя составляет 45 – 50 мкм и достигается при комплексной обработке, которая сочетает облучение при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см<sup>2</sup> и последующее азотирование при температуре 793 К в течение 3 ч. Азотирование при температуре 793 К в течение 3 ч приводит к лучшим результатам при трибологических испытаниях, а именно, износостойкость образцов стали, облученных импульсным электронным пучком при  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup>, составляет  $1,2 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м), при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup> –  $0,58 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м), что многократно выше износостойкости стали как в исходном, так и в облученном состоянии.

Методами рентгенофазового анализа установлено, что основными фазами модифицируемых образцов являются  $\alpha$ -железо и  $\gamma$ -железо, а также нитриды железа составов Fe<sub>4</sub>N, Fe<sub>2</sub>N, нитриды хрома состава CrN и сложный нитрид состава Fe<sub>3</sub>NiN. Установлено, что наиболее высокие значения микротвердости (15,8 и 15,6 ГПа) продемонстрировали образцы, подвергнутые комплексной обработке, которая сочетает предварительную обработку импульсным электронным пучком (10 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) и последующее азотирование при температурах 723 и 793 К в течение 3 ч. Для структуры поверхностного слоя данных образцов характерно формирование керамического слоя, содержащего только нитриды железа и хрома.

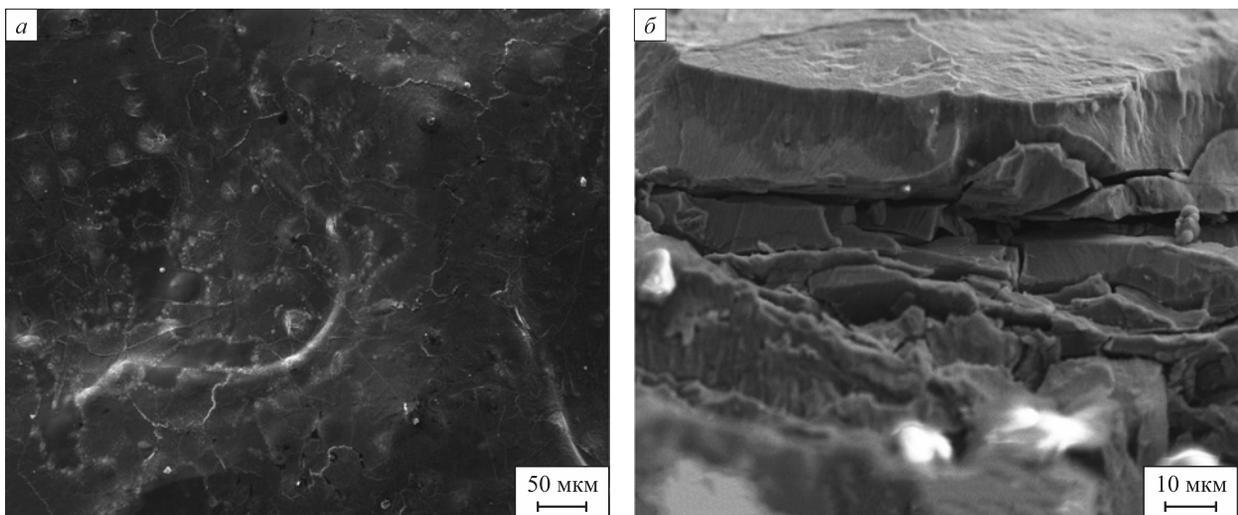
Методами сканирующей электронной микроскопии впервые обнаружено при электронно-ионно-плазменном азотировании явление блистеринга – формирование на поверхности материала пузырей (рис. 2, а).

Отметим, что образование пузырей наблюдается на поверхности металлов и сплавов, металлокерамических и керамических материалов, подвергнутых интенсивному корпускулярному воздействию (ионы Н<sup>+</sup>, В<sup>+</sup>, He<sup>+</sup> и др.), наиболее ярко проявляется в технологиях ядерных и термоядерных реакторов, а также в космосе [19 – 21].

Установлено при исследовании поверхности излома образцов, предварительно облученных импульсным электронным пучком и подвергнутых азотированию элионным методом, что разрушение поверхностного слоя стали протекает преимущественно по квазихрупкому механизму (рис. 2, б).

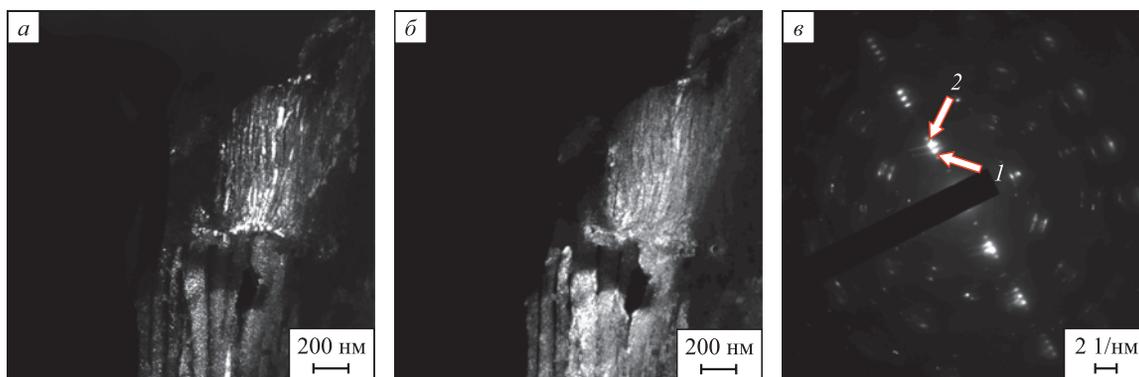
Дефектную структуру модифицированного слоя изучали методами просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что азотирование сопровождается формированием пластинчатой структуры (рис. 3).

Азотирование образцов, прошедших предварительную обработку импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см<sup>2</sup>, длительности импульса 200 мкс, количестве импульсов 3, приводит к формированию структуры с чередующимися пластинами нитрида железа и нитрида хрома. Азотирование образцов, прошедших предварительную обработку импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>, длительности импульса 200 мкс, количестве импульсов 3, сопровождается формированием структуры с чередующимися пластинами  $\gamma$ -железа и преимущественно нитридов железа.



**Рис. 2.** Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексному модифицированию, сочетающему облучение импульсным электронным пучком при 10 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. (а) и при 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. (б) и последующее азотирование при 793 К, 3 ч:  
а – поверхность модифицирования; б – поверхность излома

**Fig. 2.** Electron microscopic image of the AISI 310S steel structure subjected to complex modification, combining irradiation with a pulsed electron beam at 10 J/cm<sup>2</sup>, 200  $\mu$ s, 3 pulses (а) and 30 J/cm<sup>2</sup>, 200  $\mu$ s, 3 pulses (б) and subsequent nitriding at 793 K for 3 h:  
а – modification surface; б – fracture surface



**Рис. 3.** Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя стали 20X23H18, подвергнутой комплексной модификации (облучение импульсным электронным пучком при 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. и последующее азотирование при 793 К, 3 ч.):

*a* и *б* – темное поле, полученное в рефлексах [111]γ-Fe и [002]γ-Fe + [002]Fe<sub>4</sub>N;

*в* – микроэлектрондиограмма (стрелками указаны рефлекссы, в которых получены темные поля 1 (*a*), 2 (*б*))

**Fig. 3.** Electron microscopic images of the AISI 310S steel surface layer structure subjected to complex modification (irradiation with a pulsed electron beam at 30 J/cm<sup>2</sup>, 200 μs, 3 pulses and subsequent nitriding at 793 K for 3 h):

*a* and *b* – dark fields obtained in [111]γ-Fe and [002]γ-Fe + [002]Fe<sub>4</sub>N reflections;

*c* – microelectron diffraction pattern (arrows indicate reflections in which dark fields 1 (*a*), 2 (*b*) were obtained)

## Выводы

Осуществлено азотирование предварительно облученных импульсным электронным пучком образцов стали марки 20X23H18 в плазме газового разряда низкого давления при нагревании образцов электронами плазмы (элионный метод азотирования). Обнаружено формирование на поверхности материала при элионном азотировании пузырей (блистеринг). Азотирование сопровождается формированием пластинчатой структуры с чередующимися пластинами нитрида железа и нитрида хрома (азотирование образцов, предварительно облученных импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см<sup>2</sup>, длительности импульса 200 мкс, количестве импульсов 3) или формированием структуры с чередующимися пластинами γ-железа и преимущественно нитридов железа (азотирование образцов, предварительно облученных импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>, длительности импульса 200 мкс, количестве импульсов 3). Установлено, что наиболее высокие значения микротвердости (15,8 и 15,6 ГПа) продемонстрировали образцы, подвергнутые комплексной обработке, сочетающей предварительную обработку импульсным электронным пучком (10 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) и последующее азотирование при температурах 723 и 793 К в течение 3 ч. Наиболее высокая износостойкость (многократно превышающая износостойкость стали как в исходном, так и в облученном состояниях) наблюдается на образцах, предварительно облученных импульсным электронным пучком при  $E_S = 30$  Дж/см<sup>2</sup> и азотированных при температуре 793 К в течение 3 ч.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. Москва: изд. МГТУ им Баумана; 1999:400.
2. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. Москва: Техносфера; 2012:464.
3. Budilov V.V., Agzamov R.D., Ramazanov K.N. Ion nitriding in glow discharge with hollow cathode effect. *Metal Science and Heat Treatment*. 2007;49(7):358–361. <http://dx.doi.org/10.1007/s11041-007-0065-y>
4. Koval N.N., Ryabchikov A.I., Sivin D.O., Lopatin I.V., Krysinina O.V., Akhmadeev Yu.H., Ignatov D.Yu. Low-energy high-current plasma immersion implantation of nitrogen ions in plasma of non-self-sustained arc discharge with thermionic and hollow cathodes. *Surface and Coatings Technology*. 2018;340:152–158. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.064>
5. Lopatin I.V., Akhmadeev Yu.H., Koval N.N., Petrikova E.A. AISI 5140 steel nitriding in a plasma of a non-self-sustaining arc discharge with a thermionic cathode under the pulse action of ions. *IOP Conference Series: Journal of Physics*. 2018;1115(3):032042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032042>
6. Shen L., Wang L., Wang Y., Wang C. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening. *Surface and Coatings Technology*. 2010;204(20):3222–3227. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.018>
7. Wang L., Ji S., Sun J. Effect of nitriding time on the nitrided layer of AISI 304 austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2006;200(16-17):5067–5070. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.05.036>
8. Kaestner P., Michler Th., Weidner H., Rie K.-T., Bräuer G. Plasma nitrided austenitic stainless steels for automotive hydrogen applications. *Surface and Coatings Technology*. 2008;203(5-7):897–900. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.024>

9. Meletis E.I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering. *Surface and Coatings Technology*. 2002;149(2-3):95–113.  
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01441-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01441-4)
10. Wei R., Benn C.R., Cooper C.V. High intensity plasma ion nitriding of aermet 100 martensitic steel. *Plasma Processes and Polymers*. 2007;4(S1):S700–S706.  
<https://doi.org/10.1002/ppap.200731801>
11. Щанин П.М., Коваль Н.Н., Гончаренко И.М., Григорьев С.В. Азотирование конструкционных сталей в газовых разрядах низкого давления. *Физика и химия обработки материалов*. 2001;(3):16–19.  
Shchanin P.M., Koval' N.N., Goncharenko I.M., Grigor'ev S.V. Nitriding of structural steels in low-pressure gas discharges. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2001;(3):16–19. (In Russ.).
12. Yeo S., Lee C.M., Yoon H.S., Kim J.H. Synthesis of plasmanitrided Cr coatings on HT9 steel for advanced chemical barrier property in a nuclear cladding application. *Applied Surface Science*. 2022;579:152133.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152133>
13. Godec M., Ruiz-Zepeda Fr., Podgornik B., Donik Čr., Kocijan Al., Skobir B., Danijela A. The influence of the plasmanitriding temperature on the microstructure evolution and surface properties of additive-manufactured 18Ni300 maraging steel. *Surface and Coatings Technology*. 2022;433:128089.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128089>
14. Akhmadeev Yu.H., Ivanov Yu.F., Krysinina O.V., Lopatin I.V., Petrikova E.A., Rygina M.E. Electron-ion-plasma modification of carbon steel. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. 2021;25(1):47–55.  
<https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2021038031>
15. Ivanov Y., Lopatin I., Denisova Y., Petrikova E., Tolkachev O. Elion method of nitriding of high-chromium stainless steel: Structure and properties. In: *Proceedings – 2020 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2020*. 2020:783–787.  
<https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9241927>
16. Ivanov Yu.F., Akhmadeev Yu.H., Lopatin I.V., Petrikova E.A., Denisova Yu.A., Teresov A.D., Krysinina O.V. Complex beam-plasma surface treatment of high-chromium steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1115(3):032031.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032031>
17. Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Получение сильноточных низкоэнергетических электронных пучков в системах с плазменным эмиттером. *Известия вузов. Физика*. 2001;44(9):36–43.  
Devyatkov V.N., Koval N.N., Shchanin P.M. Obtaining high-current low-energy electron beams in systems with a plasma emitter. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2001;44(9):36–43. (In Russ.).
18. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(5):60–70.  
Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metallo-ceramic and ceramic materials by electron-beams. *Russian Physics Journal*. 2008;51(5):505–516.  
<https://doi.org/10.1007/s11182-008-9073-7>
19. Shu W.M., Wakai E., Yamanishi T. Blister bursting and deuterium bursting release from tungsten exposed to high fluences of high flux and low energy deuterium plasma. *Nuclear Fusion*. 2007;47(3):201–209.  
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/3/006>
20. Sznajder M., Geppert U., Dudek M. Degradation of metallic surfaces under space conditions, with particular emphasis on hydrogen recombination processes. *Advances in Space Research*. 2015;56(1):71–84.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01790>
21. Astrelin V.T., Burdakov A.V., Bykov P.V., Ivanov I.A., Ivanov A.A., Jongen Y., Konstantinov S.G., Kudryavtsev A.M., Kuklin K.N., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitskiy S.L., Zubairov E.R. Blistering of the selected materials irradiated by intense 200 keV proton beam. *Journal of Nuclear Materials*. 2010;396(1):43–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.10.051>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт Сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
ORCID: 0000-0001-8022-7958  
E-mail: yufi55@mail.ru

**Елизавета Алексеевна Петрикова**, младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-1959-1459  
E-mail: elizmarkova@yahoo.com

**Антон Дмитриевич Тересов**, научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-5363-0108  
E-mail: tad514@yandex.ru

**Илья Викторович Лопатин**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-5192-871X  
E-mail: lopatin@opee.hcei.tsc.ru

**Yurii F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0001-8022-7958  
E-mail: yufi55@mail.ru

**Elizaveta A. Petrikova**, Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0002-1959-1459  
E-mail: elizmarkova@yahoo.com

**Anton D. Teresov**, Research Associate of the Laboratory of Beam-Plasma Surface Engineering, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0002-5363-0108  
E-mail: tad514@yandex.ru

**Ilya V. Lopatin**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0002-5192-871X  
E-mail: lopatin@opee.hcei.tsc.ru

**Олег Сергеевич Толкачев**, младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
**ORCID:** 0000-0001-7816-9920  
**E-mail:** ole.ts@mail.ru

**Oleg S. Tolkachev**, Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0001-7816-9920  
**E-mail:** ole.ts@mail.ru

### Вклад авторов

### Contribution of the Authors

**Ю. Ф. Иванов** – формулирование концепции работы, обсуждение результатов, написание текста статьи, проведение электронно-микроскопических исследований, анализ результатов.

**Е. А. Петрикова** – проведение трибологических и механических испытаний, проведение исследований поверхности образцов методами сканирующей электронной микроскопии, обсуждение результатов.

**А. Д. Тересов** – подбор оптимальных режимов электронно-лучевой обработки образцов, проведение облучения, обсуждение результатов.

**И. В. Лопатин** – подбор оптимальных режимов азотирования, проведение экспериментов по азотированию образцов при различных температурах, обсуждение результатов.

**О. С. Толкачев** – проведение электронно-микроскопических исследований образцов, анализ результатов.

**Yu. F. Ivanov** – concept formulation, discussion of results, writing the text, conducting electron microscopic studies, analysis of results.

**E. A. Petrikova** – conducting tribological and mechanical studies, conducting scanning electron microscopic studies, discussion of results.

**A. D. Teresov** – selection of optimal electron beam treatment modes, conducting irradiation, discussion of results.

**I. V. Lopatin** – selection of optimum nitriding modes, conducting experiments on nitriding at different temperatures, discussion of results.

**O. S. Tolkachev** – conducting electron microscopic studies, analysis of results.

Поступила в редакцию 21.12.2023  
 После доработки 24.01.2024  
 Принята к публикации 11.03.2024

Received 21.12.2023  
 Revised 24.01.2024  
 Accepted 11.03.2024