

УДК 621.785.53

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-688-699

**Для цитирования:** Формирование структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали электронно-ионно-плазменным азотированием / С. П. Ереско, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 688–699. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-688-699.

**For citation:** Eresko S. P., Ivanov Yu. F., Petrikova Ye. A., Teresov A. D., Klopotov A. A. Formation of the structure, mechanical and tribological properties of high chrome steel by electronic-ion-plasma nitrogen. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 688–699. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-688-699.

## Формирование структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали электронно-ионно-плазменным азотированием\*

С. П. Ереско<sup>1\*\*</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2</sup>, Е. А. Петрикова<sup>2</sup>, А. Д. Тересов<sup>2</sup>, А. А. Клопотов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН

Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет

Российская Федерация, 634002, г. Томск, пл. Соляная, 2

\*\*E-mail: eresko07@mail.ru

*Целью настоящей работы является обнаружение закономерностей формирования структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование в плазме газового разряда низкого давления с использованием плазмогенератора с накаливаемым катодом «ПИНК». Объектом исследования являлась жаропрочная коррозионностойкая сталь аустенитного класса марки 20X23N18. Актуальность и практическая значимость исследований обусловлены сравнительно низким уровнем твердости и износостойкости сталей данного класса, имеющих широкий спектр применения в современной промышленности, в том числе, в ракетно-космической отрасли. Облучение стали 20X23N18 импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО», последующее азотирование – на установке «КВИНТА». Показано, что максимальная микротвердость 19 ГПа (превышает твердость стали перед модифицированием в 11,2 раза и твердость стали после облучения электронным пучком в 8 раз) и минимальный параметр износа  $k = 0,7 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м (меньше параметра износа стали перед модифицированием более чем в 700 раз и меньше параметра износа стали после облучения электронным пучком более чем в 750 раз) наблюдаются на образцах, подвергнутых облучению при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. и последующему азотированию при температуре 793 К в течение 3 ч. Толщина упрочненного слоя составляет 40 мкм. Установлено, что данные образцы имеют в поверхностном слое максимальное (90,6 %) содержание нитридных фаз (нитриды хрома и железа). Установлено, что после азотирования при температуре 723 К в поверхностном слое стали нитриды железа и хрома формируются в виде наноразмерных частиц округлой формы. При температурах азотирования 793 и 873 К в поверхностном слое стали формируется структура*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-700010.

The research was carried out with the financial support of the RFBR and the Administration of the Tomsk region within the framework of the scientific project No. 19-48-700010.

пластинчатого типа, образованная чередующимися параллельными друг другу пластинами нитрида железа и нитрида хрома.

*Ключевые слова:* комплексная обработка, импульсный электронный пучок, плазма газового разряда, высоколегированная сталь, структура, свойства.

## **Formation of the structure, mechanical and tribological properties of high chrome steel by electronic-ion-plasma nitrogen**

S. P. Eresko<sup>1\*\*</sup>, Yu. F. Ivanov<sup>2</sup>, Ye. A. Petrikova<sup>2</sup>, A. D. Teresov<sup>2</sup>, A. A. Klopotov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS  
2/3, Academic prospect, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building  
2, Solyanaya square, Tomsk, 634002, Russian Federation

\*\*E-mail: eresko07@mail.ru

*The purpose of this work is to detect the regularities of the formation of the structure, mechanical and tribological properties of high-chromium steel subjected to complex treatment combining irradiation with a pulsed electron beam and subsequent nitriding in a low-pressure gas discharge plasma using a plasma generator with an incandescent cathode "PINK". The object of the study was heat-resistant corrosion-resistant austenitic steel grade AISI 310. The relevance and practical significance of the research is due to the relatively low level of hardness and wear resistance of steels of this class, which have a wide range of applications in modern industry, including in the rocket and space industry. Irradiation of AISI 310 steel with a pulsed electron beam was carried out at the SOLO installation, subsequent nitriding (the QUINT installation). It was found that irradiation of samples at an electron beam energy density of 30 J/cm<sup>2</sup>, 200 microseconds, 3 pulses and subsequent nitriding at a temperature of 793 K for 3 hours led to the following changes in mechanical properties. The maximum microhardness reached values of 19 GPa (exceeds the hardness of steel before modification by 11.2 times and the hardness of steel after electron beam irradiation by 8 times). The wear parameter has changed to values  $k = 0.7 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \times \text{m}$  (less than the wear parameter of steel before modification by more than 700 times and less than the wear parameter of steel after electron beam irradiation by more than 750 times). The thickness of the hardened layer is 40 microns. It was found that the samples that have the maximum (90.6 %) content of nitride phases (chromium and iron nitrides) in the surface layer. Shown that after nitriding at a temperature of 723 K in the surface layer of steel, iron and chromium nitrides are formed in the form of nanoscale particles of rounded shape. At nitriding temperatures of 793 K and 873 K, a plate-type structure formed by alternating parallel plates of iron nitride and chromium nitride is formed in the surface layer of steel.*

*Keywords:* complex processing, pulsed electron beam, gas discharge plasma, high-alloy steel, structure, properties.

### **Введение**

Специальные, а также коррозионностойкие и нержавеющие стали являются вторым, после сплавов на основе алюминия, по применению материалом в ракетно-космической отрасли. Сравнительно низкая твердость и износостойкость являются отрицательными характеристиками нержавеющих аустенитных сталей, снижая срок службы изделий из данного материала. Модификация поверхности металлов и сплавов путем комплексной обработки, сочетающей

в различной последовательности насыщение поверхностного слоя атомами газовых элементов (азот, углерод, кислород), напыление тонких пленок различных металлов с последующим перемешиванием под действием высокоэнергетических импульсных электронных пучков, нанесение твердых и сверхтвердых износостойких покрытий и т. д. является одним из наиболее перспективных методов повышения служебных характеристик материала [1–3]. Наиболее распространенным в промышленности ионно-плазменным методом азотирования, в том числе и нержавеющей сталей, является метод, основанный на использовании аномального тлеющего разряда [1; 2; 4; 5]. Преимуществом данного метода является относительная простота как устройств, так и реализации процесса. Основные его недостатки связаны с достаточно большим давлением, при котором он реализуется, что не позволяет проводить эффективную ионную очистку обрабатываемой поверхности в процессе азотирования, существенно увеличивая длительность обработки.

Другой способ получения газовой плазмы с целью проведения процессов химико-термической обработки основан на использовании дуговых разрядов (концентрация плазмы ( $10^{15}$ – $10^{18}$ )  $\text{м}^{-3}$  в объемах до нескольких  $\text{м}^3$ ). Наиболее перспективным на настоящий момент является метод формирования разряда низкого давления с накаливаемым катодом, который обеспечивает генерацию плазменного потока без микрокапель [6–9]. С использованием комбинированного катода, включающего накаливаемый и полярный катоды в Институте сильноточной электроники СО РАН был разработан плазмогенератор «ПИНК» [9].

В последние годы активно развиваются методы комбинированной обработки поверхности деталей и изделий. Одним из перспективных вариантов комбинированной обработки является использование, дополнительно к азотированию, облучения материала импульсным электронным пучком [10]. Широкое распространение получили электронные источники на основе взрывоэмиссионного катода [11; 12] и с плазменными катодами [13; 14]. Установка «СОЛО» УНУ «УНИКУУМ», которая была использована при исследованиях, рассмотренных в настоящей работе, оснащена электронным источником с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы, позволяет генерировать электронный пучок с током до 300 А, энергией электронов до 25 кВ, длительностью импульса (20–200) мкс, плотностью энергии в импульсе до 80 Дж/см<sup>2</sup>, частотой следования импульсов до 15 с<sup>-1</sup> [15–17]. Все параметры можно регулировать плавно и независимо друг от друга. Использование ускоряющего напряжения до 25 кВ не требует наличия дополнительной радиационной защиты.

Цель настоящей работы – обнаружение закономерностей формирования структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование в плазме газового разряда низкого давления с использованием плазмогенератора с накаливаемым катодом «ПИНК».

### **Материал и методики исследования**

Материалом исследования являлись образцы стали 20Х23Н18 (аналог США AISI 310). Образцы имели форму пластинок размерами (15×15×5) мм. Облучение стали осуществляли на установке «СОЛО» [17] (18 кВ, (10 и 30) Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп., 0,3 с<sup>-1</sup>, остаточное давление аргона 0,02 Па). Азотирование (723–873 К, 1–5 ч) проводили на установке «КВИНТА», оснащенной плазмогенератором «ПИНК». Исследования структуры и фазового состава материала осуществляли методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Свойства модифицированного слоя характеризовали микротвердостью и износостойкостью.

### Результаты исследования и обсуждение

Показано, что облучение стали импульсным электронным пучком приводит к существенному преобразованию структуры поверхностного слоя стали. При плотности энергии пучка электронов  $10 \text{ Дж/см}^2$  (200 мкс, 3 имп.), во-первых, в пределах одного зерна выявляется несколько систем микродвойникования (рис. 1, а); во-вторых, увеличивается количество изгибных контуров экстинкции, что свидетельствует об увеличении амплитуды внутренних полей напряжений и росте количества концентраторов напряжений (рис. 1, б); в-третьих, в 1,5 раза (относительно исходного состояния) увеличивается скалярная плотность дислокаций.

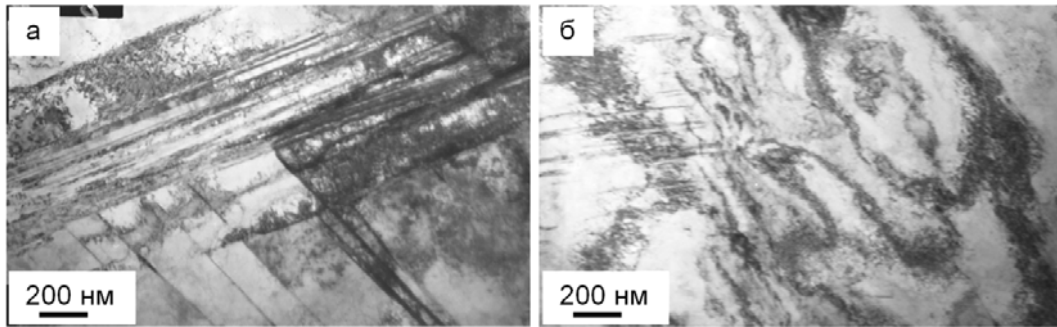


Рис. 1. Структура поверхностного слоя стали, облученной импульсным электронным пучком ( $10 \text{ Дж/см}^2$ , 200 мкс, 3 имп.)  
 Fig. 1. Structure of the surface layer of steel irradiated with a pulsed electron beam ( $10 \text{ J/cm}^2$ , 200 microseconds, 3 pulses).

Увеличение плотности энергии пучка электронов до  $30 \text{ Дж/см}^2$  приводит к плавлению поверхностного слоя и формированию структуры ячеистой кристаллизации (рис. 2, а).

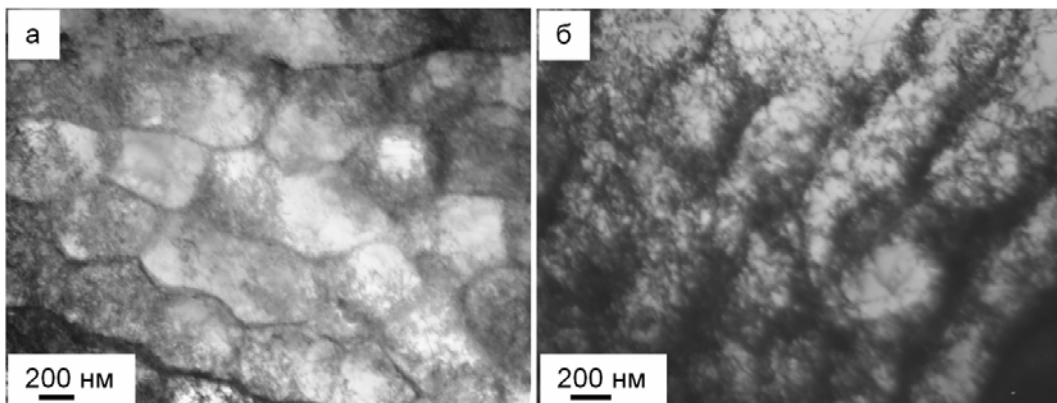


Рис. 2. Структура поверхностного слоя стали, облученной импульсным электронным пучком ( $30 \text{ Дж/см}^2$ , 200 мкс, 3 имп.)  
 Fig. 2. Structure of the surface layer of steel irradiated with a pulsed electron beam ( $30 \text{ J/cm}^2$ , 200 microseconds, 3 pulses)

Размер ячеек изменяется в пределах 300–400 нм. В объеме ячеек присутствует дислокационная субструктура (рис. 2, б). Скалярная плотность дислокаций  $2,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , т. е. ниже скалярной плотности дислокаций поверхностного слоя стали, облученной электронным пучком в режиме твердофазной модификации материала ( $10 \text{ Дж/см}^2$ , 200 мкс, 3 имп.). Вдоль границ и в стыках границ ячеек кристаллизации выявляются частицы второй фазы. Анализ микроэлектроннограмм позволяет утверждать, что данные частицы являются преимущественно карбидом хрома.

Установлено методами рентгеноструктурного анализа, что независимо от режима облучения и последующего азотирования в поверхностном слое стали формируется многофазная поликристаллическая структура (рис. 3). Основными фазами исследуемых образцов являются  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe, а также нитрид железа состава  $\text{Fe}_4\text{N}$  и нитрид хрома состава CrN. Максимальное (90,6 %) содержание нитридных фаз выявлено в поверхностном слое стали, прошедшей предварительную обработку импульсным электронным пучком (30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) и последующее азотирование при 793 К в течение 3 ч.

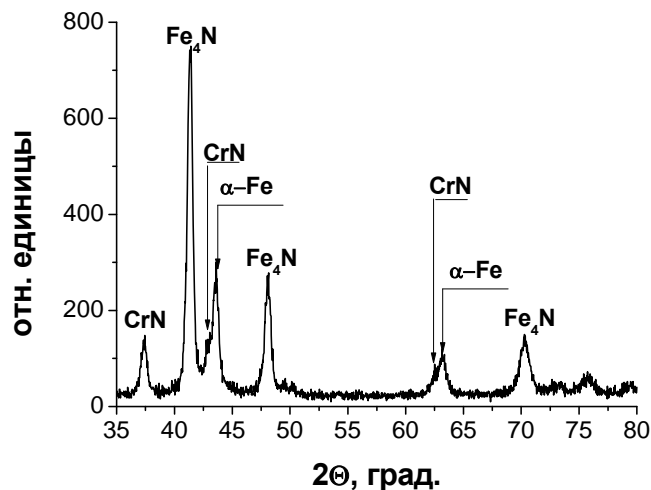


Рис. 3. Участок рентгенограммы образца стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. + 793 К, 3 ч)

Fig. 3. X-ray section of a AISI 310 steel sample subjected to complex treatment (30 J/cm<sup>2</sup>, 200 microseconds, 3 pulses + 793 K, 3 hours)

Морфологию фаз и дефектную субструктуру модифицированного слоя стали 20Х23Н18 изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM 2100F, JEOL). На рис. 4, а приведено электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения поверхностного слоя образца стали, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. + 793 К, 3 ч). Отчетливо видно, что формирующаяся структура является многослойной. Выявляются поверхностный слой (рис. 4, слой № I), имеющий столбчатую (пластинчатую) структуру, переходный слой (рис. 4, слой № II), имеющий наноразмерную структуру зеренного типа, и слой термо-диффузионного влияния (рис. 4, слой № III), имеющий структуру зеренного типа с наноразмерными частицами второй фазы. Толщина слоя I достигает 3,5–4 мкм, толщина слоя II – 0,35–0,45 мкм; толщина слоя III – ≈35 мкм. Методами микродифракционного анализа с использованием темнопольной методики установлено, что поверхностный слой стали сформирован чередующимися пластинами нитридов железа и хрома. Данный тип структуры формируется после азотирования при температурах 793 и 873 К. Азотирование при температуре 723 К приводит к формированию в поверхностном слое стали многофазной зеренной структуры субмикронных размеров (рис. 5). В объеме зерен наблюдаются наноразмерные (5–12 нм) включения нитридов железа и хрома.

Механические (микротвердость) и трибологические (износостойкость при сухом трении) испытания образцов стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке, позволили выявить для каждой из температур азотирования режимы модифицирования, показавшие наилучшие свойства. Наиболее высокий комплекс свойств выявлен у образцов, подвергнутых облучению (30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп.) и последующему азотированию (793 К, 3 ч). Толщина упрочненного слоя данных образцов составляет 40 мкм, твердость на поверхности модифицирования

19 ГПа (превышает твердость стали перед модифицированием в 11,2 раза и твердость стали после облучения импульсным электронным пучком в 8 раз); параметр износа (величина, обратная износостойкости) –  $0,7 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н×м (меньше параметра износа стали перед модифицированием, равного  $495 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н×м, более чем в 700 раз и меньше параметра износа стали после облучения электронным пучком, равного  $520 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н×м, более чем в 750 раз).

Анализ изотермических сечений тройных диаграмм систем Cr–Fe–N, Cr–Ni–N, Fe–Ni–N и Cr–Fe–Ni позволил установить, что в системе Fe–Ni–N существует узкая область твердого раствора на основе фазы  $\gamma$ (Fe, Ni), а в системе Cr–Fe–Ni – обширная область трехкомпонентного твердого раствора (Cr, Fe, Ni) (рис. 6) [21]. Все это позволило предположить, что в четырехкомпонентной системе Cr–Fe–Ni–N возможно образование четырехкомпонентного твердого раствора (Cr, Fe, Ni, N) на основе  $\gamma$ (Fe, Ni) фазы.

Следует отметить, что представленный в данной статье метод модификации поверхности металлов и сплавов интенсивным импульсным электронным пучком, позволяющий значительно улучшить физико-механические свойства поверхностных слоев металлов и сплавов, достаточно подробно рассмотрен в работах [22–28].

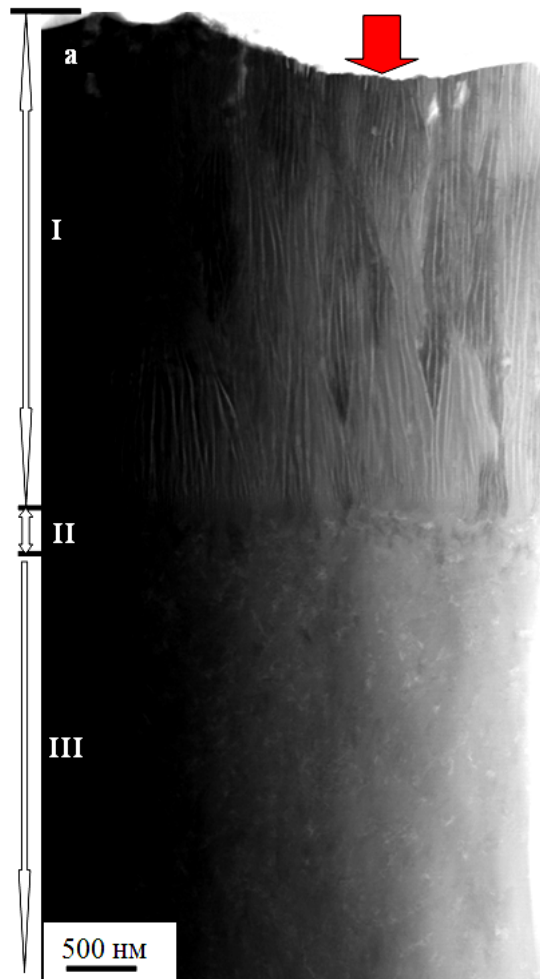


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения образца стали 20X23H18, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. + 793 К, 3 ч); изображение, полученное методами STEM

Fig. 4. Electron microscopic image of the cross-sectional structure of a AISI 310 steel sample subjected to complex processing (30 J/cm<sup>2</sup>, 200 microseconds, 3 pulses. + 793 K, 3 hours); image obtained by STEM methods

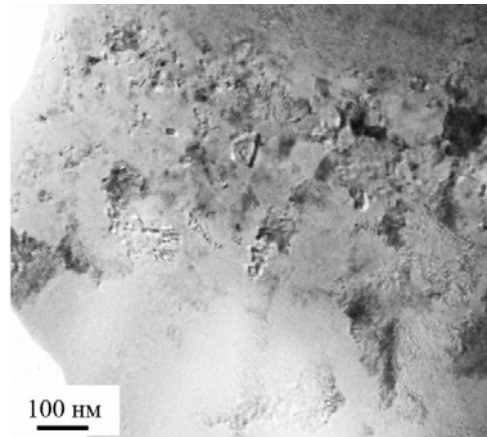


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения образца стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. + 723 К, 3 ч)

Fig. 5. Electron microscopic image of the cross-sectional structure of a AISI 310 steel sample subjected to complex processing (30 J/cm<sup>2</sup>, 200 microseconds, 3 pulses + 723 K, 3 hours)

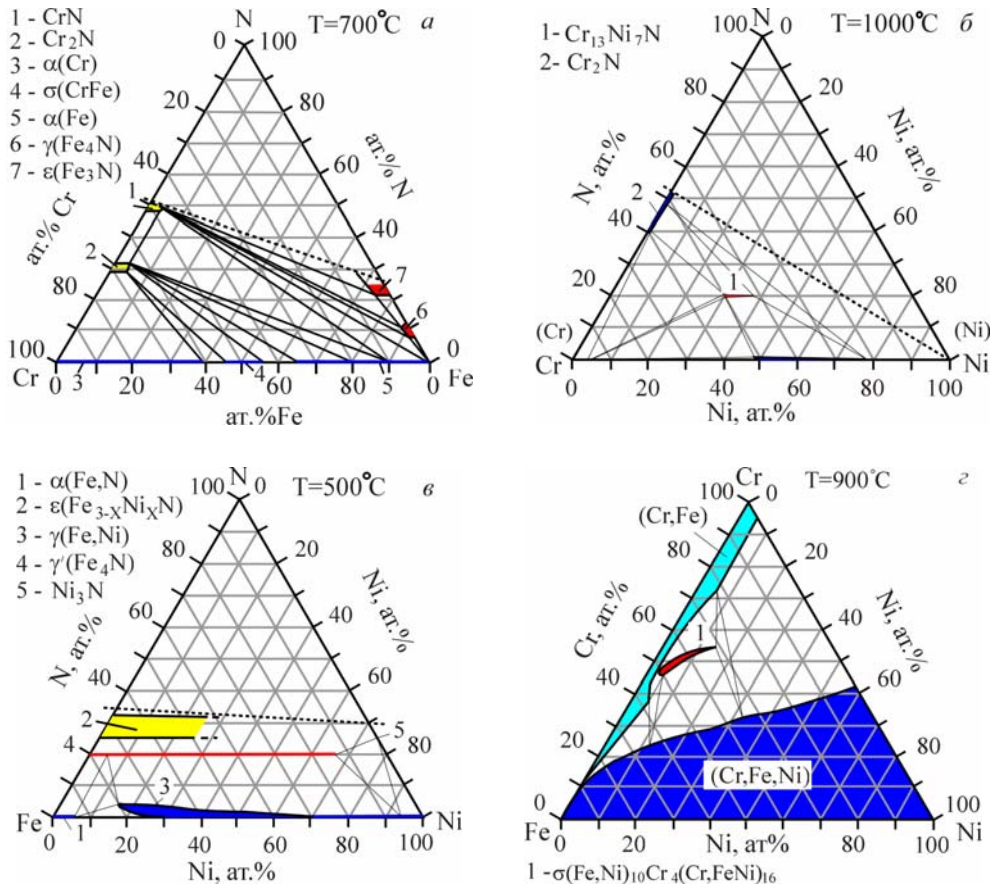


Рис. 6. Изотермические сечения тройных систем Cr-Fe-N [18], Cr-Ni-N [19], Fe-Ni-N [20] и Cr-Fe-Ni [21]

Fig. 6. Isothermal sections of triple systems Cr-Fe-N [18], Cr-Ni-N [19], Fe-Ni-N [20] и Cr-Fe-Ni [21]

### Заключение

Комплексным методом, совмещающим в определенной последовательности облучение импульсным электронным пучком и азотирование в плазме газового разряда низкого давления с использованием плазмогенератора с накаливаемым катодом «ПИНК», осуществлена обработка поверхности образцов стали 20Х23Н18. Установлено, что после азотирования при температуре 723 К в поверхностном слое облученных образцов стали нитриды железа и хрома формируются в виде наноразмерных частиц округлой формы. При температурах азотирования 793 и 873 К в поверхностном слое стали формируется структура пластинчатого типа, образованная чередующимися параллельными друг другу пластинами нитрида железа и нитрида хрома. Показано, что максимальная микротвердость, 19 ГПа (превышает твердость стали перед модифицированием в 11,2 раза и твердость стали после облучения электронным пучком в 8 раз) и минимальный параметр износа,  $k = 0,7 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м (меньше параметра износа стали перед модифицированием более чем в 700 раз и меньше параметра износа стали после облучения электронным пучком более чем в 750 раз), наблюдаются на образцах, подвергнутых облучению при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>, 200 мкс, 3 имп. и последующему азотированию при температуре 793 К в течение 3 ч. Толщина упрочненного слоя составляет 40 мкм. Установлено, что образцы, продемонстрировавшие наиболее высокие значения твердости и износостойкости, имеют в поверхностном слое максимальное (90,6 %) содержание нитридных фаз (нитриды хрома и железа).

### Библиографические ссылки

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. М. : МГТУ, 1999. 400 с.
2. Берлин Е. В., Коваль Н. Н., Сейдман Л. А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М. : Техносфера, 2012. 464 с.
3. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванова и др. Томск : НТЛ, 2016. 304 с.
4. Lie Sh., Liang W., Yizuo W., Chunhua W. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot penning // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204, No. 20, P. 3222–3227.
5. Mirjani M., Shafyei A., Ashrafizadeh F. Plasma and gaseous nitrocarburizing of C60W steel for tribological applications // *Vacuum*. 2009. Vol. 83, No. 7, P. 1043–1048.
6. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering // *Surface and Coatings Technology* // *Surface and Coatings Technology*. 2002. Vol. 149, No. 2-3, P. 95–113.
7. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of AerMet 100 Martensitic Steel // *Plasma Process. Polym.* 2007. Vol. 4, No. 1, P. 700–706.
8. A new high-temperature plasma immersion ion implantation system with electron heating / R. M. Oliveira, J. A. N. Goncalves, M. et al. Ueda // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204, No. 18-19. P. 3009–3012.
9. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом / П. М. Щанин, Н. Н. Коваль, И. М. Гончаренко, С. В. Григорьев // *Физика и химия обработки материалов*. 2001. № 3. С. 16–19.
10. Грибков В. А., Григорьев Ф. И., Калинин Б. А. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М. : Круглый стол, 2001. 528 с.
11. Nazarov D. S., Ozur G. E., Proskurovsky D. I. Production of Low-Energy, High-Current Electron Beams in a Reflected Discharge Plasma-Anode Gun // *Proc. of 11th IEEE Int. Pulsed Power Conference*. Baltimore. USA. 1997. Vol. II. P. 1335–1340.



12. Engelko V., Mueller G., Bluhm H. Influence of particle fluxes from target on characteristics of intense electron beams // *Vacuum*. 2001. Vol. 62/2-3. P. 97–103.
13. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Н. В. Гаврилов, В. И. Гушенец, Н. Н. Коваль др. Екатеринбург : УИФ Наука, 1993. 148 с.
14. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode / S. V. Grigoriev, N. N. Koval, V. N. Devjatkov, A. D. Teresov // *Proc. 9th Intern. Conf. On Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk. 2008. P. 19–22.
15. Koval N. N., Ivanov Yu. F. Nanostructuring of surfaces of metaloceramic and ceramic materials by electron-beams // *Russian Physics Journal*. 2008. Vol. 51. P. 505–516.
16. Complex electron-ion-plasma treatment of titanium: methods, structure, properties / Yu. F. Ivanov, O. V. Krygina, E. A. Petrikova et al. // *High Temperature Material Processes*. 2017. Vol. 21(1). P. 53–64.
17. Коваль Н. Н., Иванова Ю. Ф. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. Томск : НТЛ, 2016. 312 с.
18. Raghavan V. The Cr-Fe-N System in Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys // *Indian Inst. Metals, Calcutta*. 1987. Vol. 1. P. 171–182.
19. Hertzman S. A. Study of Equilibria in the Fe-Cr-Ni-Mo-C-N System at 1273 K // *Metallurgical Transactions, Section A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1987. Vol. 18. P. 1767–1778.
20. Frisk K. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Ni-N System // *Z. Metallkd.* 1991. No. 82. P. 59–66.
21. Lee B.-J. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Cr-Ni System // *J. Korean Inst. Met.* 1993 Vol. 31. P. 480–489.
22. Структурно-фазовое состояние и свойства заэвтектического силумина, обработанного импульсным электронным пучком / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, А. А. Клопотов и др. // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2021. Т. 22, № 2. С. 371–382.
23. Структурно-фазовые состояния наноструктурированных поверхностных слоев титана BT1-0 после комбинированной электронно-ионно-плазменной обработки / Ю. Ф. Иванов, А. Д. Тересов, В. Е. Громов и др. // *Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф.* / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 291–293.
24. Особенности структурно-фазового состояния на поверхности силумина, сформированного методами электронно-ионно-плазменной обработки / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, А. А. Клопотов и др. // *Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф.* / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 615–617.
25. Разработка комбинированного электронно-ионно-плазменного метода формирования многофазных субмикронаноразмерных сплавов на основе алюминия / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, Ю. Х. Ахмадеев и др. // *Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф.* / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 490–492.
26. Многоцикловое поверхностное легирование силумина титаном / Ю. Ф. Иванов, А. А. Клопотов, С. П. Ереско и др. // *Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф.* / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. Ч. 1. С. 526–528.
27. Разработка комбинированного электронно-ионно-плазменного метода формирования многофазных субмикронаноразмерных сплавов на основе алюминия / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, Ю. Х. Ахмадеев и др. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2019. Т. 20, № 1. С. 88–98.
28. Комплексный электронно-ионно-плазменный метод азотирования высоколегированной стали / С. П. Ереско, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова и др. // *Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф.* / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. Ч. 1. С. 555–557.

**References**

1. Arzamasov B. N., Bratuhin A. G., Eliseev Ju. S., Panajoti T. A. *Ionnaya himiko-termicheskaya obrabotka splavov* [Ionic chemical-thermal treatment of alloys]. Moscow, MGTU Publ., 1999, 400 p.
2. Berlin E. V., Koval' N. N., Sejdman L. A. *Plazmennaya himiko-termicheskaja obrabotka poverhnosti stal'nyh detaley* [Plasma chemical-thermal surface treatment of steel parts]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2012, 464 p.
3. Kovalja N. N., Ivanova Ju. F. *Jevolyuciya struktury poverhnostnogo sloja stali, podvergnutoy elektronno-ionno-plazmennym metodam obrabotki* [Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods]. Tomsk, NTL Publ., 2016, 304 p.
4. Lie Sh., Liang W., Yizuo W., Chunhua W. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot penning. *Surface and Coatings Technology*. 2010, Vol. 204, No. 20, P. 3222–3227.
5. Mirjani M., Shafyei A., Ashrafizadeh F. Plasma and gaseous nitrocarburizing of C60W steel for tribological applications. *Vacuum*. 2009, Vol. 83, No. 7, P. 1043–1048.
6. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering. *Surface and Coatings Technology*. 2002, Vol. 149, No. 2-3, P. 95–113.
7. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of AerMet 100 Martensitic Steel. *Plasma Process. Polym.* 2007, Vol. 4, No. 1, P. 700–706.
8. Oliveira R. M., Goncalves J. A. N., Ueda M., Rossi J. O., Rizzo P. N. A new high-temperature plasma immersion ion implantation system with electron heating. *Surface and Coatings Technology*. 2010, Vol. 204, No. 18-19, P. 3009–3012.
9. Shhanin P. M., Koval' N. N., Goncharenko I. M., Grigor'ev S. V. [Generation of volumetric plasma by an arc discharge with an incandescent cathode]. *Fizika i himiya obrabotki materialov*. 2001, No. 3, P. 16–19 (In Russ.).
10. Gribkov V. A., Grigoriev F. I., Kalin B. A. *Perspektivnye radiacionno-puchkovye tehnologii obrabotki materialov* [Promising radiation-beam technologies of materials processing]. Moscow, Kruglyy stol Publ., 2001, 528 p.
11. Nazarov D. S., Ozur G. E., Proskurovsky D. I. Production of Low-Energy, High-Current Electron Beams in a Reflected Discharge Plasma-Anode Gun. *Proc. of 11th IEEE Int. Pulsed Power Conference*. Baltimore, USA, 1997, Vol. II, P. 1335–1340.
12. Engelko V., Mueller G., Bluhm H. Influence of particle fluxes from target on characteristics of intense electron beams. *Vacuum*. 2001, Vol. 62/2-3, P. 97–103.
13. Gavrilov N. V., Gushenec V. I., Koval' N. N. *Istochniki zaryazhennyh chastic s plazmennym emitterom* [Sources of charged particles with a plasma emitter]. Ekaterinburg, UIF Nauka Publ., 1993, 148 p.
14. Grigoriev S. V., Koval N. N., Devjatkov V. N., Teresov A. D. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode. *Proc. 9th Intern. Conf. On Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk, 2008, P. 19–22.
15. Koval N. N., Ivanov Yu. F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams. *Russian Physics Journal*. 2008, Vol. 51, P. 505–516.
16. Ivanov Yu. F., Krysina O. V., Petrikova E. A. et al. Complex electron-ion-plasma treatment of titanium: methods, structure, properties. *High Temperature Material Processes*. 2017, Vol. 21(1), P. 53–64.
17. Koval N. N., Ivanov Yu. F. *Jelektronno-ionno-plazmennaja modifikacija poverhnosti cvetnyh metallov i splavov* [Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys]. Tomsk, NTL Publ., 2016, 312 p.

18. Raghavan V. The Cr-Fe-N System in Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys. *Indian Inst. Metals, Calcutta*. 1987, Vol. 1, P. 171–182.
19. Hertzman S. A. Study of Equilibria in the Fe-Cr-Ni-Mo-C-N System at 1273 K. *Metallurgical Transactions, Section A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1987, Vol. 18, P. 1767–1778.
20. Frisk K. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Ni-N System. *Z. Metallkd.* 1991, No. 82, P. 59–66.
21. Lee B.-J. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Cr-Ni System. *J. Korean Inst. Met.* 1993, Vol. 31, P. 480–489.
22. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Klopotov A. A., Rygina M. Ye., Petrikova Ye. A., Teresov A. D. [Structural-phase state and properties of hypereutectic silumin treated with a pulsed electron beam]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 371–382 (In Russ.).
23. Ivanov Yu. F., Teresov A. D., Gromov V. Ye., Budovskikh Ye. A., Klopotov A. A. [Structural-phase states of nanostructured surface layers of VT1-0 titanium after combined electron-ion-plasma treatment]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2014, Ch. 1, P. 291–293 (In Russ.).
24. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Klopotov A. A., Petrikova Ye. A., Gromov V. Ye. [Features of the structural-phase state on the surface of silumin, formed by methods of electron-ion-plasma treatment]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2017. Ch. 1, P. 615–617 (In Russ.).
25. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Akhmadeyev Yu. X., Lopatin I. V., Klopotov A. A. [Development of a combined electron-ion-plasma method for the formation of multiphase submicro-nanosized alloys based on aluminum]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2018, Ch. 1, P. 490–492 (In Russ.).
26. Ivanov Yu. F., Klopotov A. A., Yeresko S. P., Petrikova Ye. A., Lopatin I. V. [Multicycle surface alloying of silumin with titanium]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2019, Ch. 1, P. 526–528 (In Russ.).
27. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Akhmadeyev Y. K., Lopatin I. V., Klopotov A. A. [Development of a combined electron-ion-plasma method for the formation of multiphase submicro-nanoscale alloys based on aluminum]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2019, Vol. 20, No. 1. P. 88–98 (In Russ.).
28. Yeresko S. P., Ivanov Yu. F., Petrikova Ye. A., Teresov A. D., Klopotov A. A. [Complex electron-ion-plasma method of nitriding high-alloy steel]. *Reshetnevskiy chteniya : materialy XXV Mezhdunarodnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2021, Ch. 1, P. 555–557 (In Russ.).

© Ереско С. П., Иванов Ю. Ф., Петрикова Е. А.,  
Тересов А. Д., Клопотов А. А., 2021

---

**Ереско Сергей Павлович** – доктор технических наук, заслуженный изобретатель Российской Федерации, член-корреспондент Академии наук ВШ РФ, профессор, профессор кафедры основ конструирования машин; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: eresko07@mail.ru.

**Иванов Юрий Федорович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: yufi55@mail.ru.

**Петрикова Елизавета Алексеевна** – младший научный сотрудник; Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: petrikova@opec.hcei.tsc.ru.

**Тересов Антон Дмитриевич** – старший научный сотрудник; Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: tad514@yandex.ru.

**Клопотов Анатолий Анатольевич** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения; Томский государственный архитектурно-строительный университет. E-mail: klopotovaa@tsuab.ru.

**Eresko Sergei Pavlovich** – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: eresko07@mail.ru.

**Ivanov Yurii Fedorovich** – Dr. Sc., Chief Researcher; Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: yufi55@mail.ru.

**Petrikova Elizaveta Alekseevna** – Junior Researcher; Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: petrikova@opee.hcei.tsc.ru.

**Teresov Anton Dmitrievich** – Senior Researcher; Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: tad514@yandex.ru.

**Klopotov Anatolii Anatolevich** – Dr. Sc., Professor; Tomsk State University of Architecture and Building. E-mail: klopotovaa@tsuab.ru.

---