



Оригинальная статья

УДК 621.785.53:539.25

DOI 10.17073/0368-0797-2022-2-127-133



КОМПЛЕКСНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 40Х

Ю. Ф. Иванов, Ю. Х. Ахмадеев, И. В. Лопатин,
О. В. Крысина, Е. А. Петрикова

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

Аннотация. Комплексное легирование, сочетающее в определенной последовательности насыщение поверхностного слоя материала атомами металлов и газов, в настоящее время широко используется в большинстве промышленно развитых стран мира. Настоящая работа посвящена выявлению и анализу закономерностей изменения элементного и фазового состава, дефектной субструктуры, механических (микротвердость) и трибологических (износостойкость и коэффициент трения) свойств легированной углеродистой стали, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей насыщение поверхностного слоя образцов атомами алюминия и последующее азотирование. В качестве материала исследования использована сталь 40Х, имеющая в исходном состоянии структуру, представленную зернами феррита и зернами перлита пластинчатой морфологии. Комплексное модифицирование осуществляли в едином вакуумном пространстве на установке «ТРИО» с размерами камеры $600 \times 600 \times 600$ мм³, оснащенной блоком коммутации для реализации элионного (электронного и ионного) режима обработки. Алитирование проводили при температуре 963 К в течение 4 часов. Катод электродугового испарителя был изготовлен из алюминиевого сплава А7 (98,8 % Al). Последующее азотирование алитированного слоя проводили при температуре 803 К в течение 2 часов. Установлено, что в результате комплексной обработки формируется модифицированный слой толщиной до 70 мкм. Показано, что комплексное модифицирование стали сопровождается формированием многофазного субмикро- и наноструктурного состояния, содержащего нитриды алюминия, нитриды и алуминиды железа и хрома. Установлено, что твердость стали максимальна на поверхности модифицирования и превышает твердость исходного материала в три раза. Износостойкость стали в условиях сухого трения после комплексного модифицирования снижается.

Ключевые слова: сталь 40Х, комплексная обработка, алитирование, азотирование, структура, фазовый состав, твердость, износостойкость, коэффициент трения

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00111.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Ахмадеев Ю.Х., Лопатин И.В., Крысина О.В., Петрикова Е.А. Комплексная электронно-ионно-плазменная обработка поверхности стали 40Х // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 127–133.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-127-133>

Original article

COMBINED ELECTRON-ION-PLASMA TREATMENT OF 40Cr STEEL SURFACE

Yu. F. Ivanov, Yu. Kh. Akhmadeev, I. V. Lopatin,
O. V. Krysin, E. A. Petrikova

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

Abstract. In the industry of most developed countries, complex alloying as a surface layer saturation with metal and gas atoms in a certain sequence is extensively used. This study identifies and analyzes the changes in the elemental and phase composition, defect substructure, mechanical (microhardness), and tribological (wear resistance and friction ratio) properties of alloyed carbon steel after complex treatment, consisting of surface layer saturation with Al atoms and subsequent nitriding. We studied 40Cr steel. Its initial structure contains plate-like ferrite and pearlite grains. A TRIO system with a $600 \times 600 \times 600$ mm³ vacuum chamber was used for complex alloying. The system was equipped with a control module for electron-ionic treatment. Aluminizing lasted for 4 hours at 963 K. The electric arc evaporator cathode was made of A7 aluminum alloy (98.8 % Al). Subsequent nitriding of the aluminized layer lasted for 2 hours at 803 K. It was found that such treatment results in a modified surface layer up to 70 μm thick. The complex alloying of steel forms multiphase submicro- and nanostructures with Al nitrides, Fe and Cr nitrides, and

aluminides. We found that steel hardness is greatest at the modified surface. It exceeds the initial hardness by 300 %. Complex alloyed steel is less resistant to dry friction.

Keywords: 40Cr steel, complex treatment, aluminizing, nitriding, structure, phase composition, hardness, wear resistance, friction ratio

Funding: This study was supported by Rosatom and RFBR, Project No. 20-21-00111.

For citation: Ivanov Yu.F., Akhmedeev Yu.Kh., Lopatin I.V., Krysin O.V., Petrikova E.A. Combined Electron-Ion-Plasma Treatment of 40Cr Steel Surface. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 127–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-127-133>

ВВЕДЕНИЕ

Управление структурой и свойствами поверхностного слоя металлов и сплавов осуществляется различными методами. Наиболее перспективные методы совмещают изменение дефектной субструктуры, химического и фазового состава внедрением в поверхностный слой различных элементов путем ионной имплантации [1–3], путем использования лучей лазера [4], путем газофазного насыщения [5], диффузионным насыщением из растворов легкоплавких жидких металлов [6, 7], методами жидкофазного насыщения [8, 9], в результате облучения мощными ионными потоками [10], путем легирования в процессе выплавки стали [11], методами высокотемпературного азотирования в атмосфере чистого азота [12], путем высокотемпературного насыщения из обмазки [13]. Особый интерес, с точки зрения получения поверхностных сплавов, представляют методы комплексного легирования, сочетающего в определенной последовательности насыщение поверхностного слоя материала атомами металлов и газов. Комплексные методы обработки поверхности твердого тела, основанные на плазменном воздействии на структуру и свойства материала, широко используются в большинстве промышленно развитых странах мира [14–19], однако методы, реализующиеся в едином вакуумном пространстве, находятся в настоящее время в стадии разработки и изучения [20–23].

Целью настоящей работы является анализ закономерностей комплексной обработки в едином вакуумном пространстве углеродистой легированной стали, сочетающей последовательное диффузионное насыщение поверхностного слоя алюминием и азотом.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использовали сталь 40X (0,36–0,44 % C; 0,17–0,37 % Si; 0,5–0,8 % Mn; до 0,3 % Ni; 0,8–1,1 % Cr; до 0,035 % S; до 0,035 % P; до 0,3 % Cu; остальное железо (по массе)). Обрабатывались полированные образцы толщиной 5 мм, диам. 12 мм. Эксперименты проводили на ионно-плазменной установке «ТРИО» с размерами вакуумной камеры 600×600×600 мм³ [17, 18]. Рабочую камеру установки вакуумировали турбомолекулярным насосом с производительностью 500 л/с. Установка оснащена двумя плазмифическими устройствами для генерации газовой («ПИНК») и металлической

(электродугового испарителя) плазмы. Катод электродугового испарителя был изготовлен из алюминиевого сплава А7 (98,8 % Al). Особенностью работы системы была возможность реализации элионного режима работы. Такой режим подразумевает периодическое переключение горения разрядов с основного анода (камеры) на деталь. Это обеспечивает эффективный подогрев обрабатываемых образцов электронной компонентой плазмы без ионного травления их поверхности. Очистка поверхности образцов производится в перерывах между их электронным нагревом. Величина напряжения смещения при такой обработке устанавливается, исходя из соображений минимально необходимой очистки поверхности, а не поддержания заданной температуры. Образцы закрепляли 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. Температура образцов при алитировании (963 К) была выбрана из соображений минимального ее превышения над температурой плавления алюминия (950 К). Перед алитированием образцы подвергали очистке ионами аргона с энергией 700 эВ в течение 10 мин, после чего нагревали аргоновой плазмой в режиме электронного нагрева до требуемой температуры (963 К). Частота переключения режимов ионной очистки и электронного подогрева образцов составляла 10–50 Гц. Режимы обработки стали 40X (где p_{Ar} – давление аргона; $I_{\text{пнк}}$ и $I_{\text{дуг}}$ – ток разряда плазмогенератора «ПИНК» и электродугового испарителя; $U_{\text{см}}$ – величина отрицательного смещения в режиме ионной очистки; $k_{\text{эл}}$ – доля времени, в течение которого происходит электронный подогрев образцов; t – длительность процесса; T – температура образцов во время проведения процесса) приведены в таблице.

Режимы обработки образцов стали 40X

Treatment modes of 40Cr steel samples

p_{Ar} , Па	$I_{\text{пнк}}$, А	$I_{\text{дуг}}$, А	$U_{\text{см}}$, В	t , ч	T , К	$k_{\text{эл}}$, %
Алитирование						
0,20	45	45	300	4	963	27
Азотирование						
0,65	45	0	300	2	803	22

Исследования структуры, элементного и фазового составов модифицированной стали осуществляли методами рентгенофазового анализа, оптической, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Механические свойства стали характеризовали 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 SiC, диаметр трека износа 4 мм, нагрузка 5 Н, длина пути трения 2000 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура стали 40Х перед модифицированием была сформирована зернами перлита пластинчатой морфологии и зернами феррита. В объеме пластин феррита перлитных колоний и зерен феррита наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций. Структуры подобного типа ранее были подробно проанализированы в многочисленных статьях и монографиях [24, 25] и в настоящей работе рассматриваться не будут.

Толщина модифицированного слоя, выявляемого методами металлографии травленного шлифа, достигает наибольших размеров, равных приблизительно 30 мкм, после комплексной обработки, сочетающей алитирование и последующее азотирование. Методами микро-рентгеноспектрального анализа выявлено монотонное снижение концентрации алюминия в поверхностном слое стали (рис. 1). Концентрация хрома в алитированном слое практически не изменяется и соответствует концентрации данного элемента в объеме образца. Последнее позволяет утверждать, что использованный в настоящей работе метод алитирования сопровождается формированием именно насыщенного алюминием

слоя стали, а не поверхностной пленки на основе алюминия на образце.

Исследования, выполненные методами рентгенофазового анализа, выявили формирование в поверхностном слое стали, подвергнутом комплексной обработке, структуры, фазовый состав которой представлен твердым раствором на основе α -железа, нитридами железа состава Fe_4N , Fe_3N и нитридом алюминия состава AlN (рис. 2). Суммарная объемная доля нитридных фаз в поверхностном слое стали составляет 98 %, из них 2 % приходится на нитрид алюминия и 20 % – на нитрид железа состава Fe_3N .

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что в поверхностном слое формируется поликристаллическая структура с размером зерен 1,0 – 2,5 мкм. По границам и в объеме зерен располагаются частицы второй фазы. Методами темнопольного анализа выявлено, что по границам зерен α -железа в результате комплексной обработки формируются частицы карбонитридов железа и хрома, а также алюминиды хрома состава Al_2Cr и алюминиды железа состава Al_2Fe . Частицы имеют преимущественно глобулярную форму, размеры частиц изменяются в пределах от 80 до 100 нм. В объеме зерен выявлены частицы игольчатой формы (рис. 3). Анализ соответствующих микроэлектроннограмм позволяет утверждать, что данные частицы являются алюминидами хрома состава Al_3Cr_4 . Поперечный размер частиц изменяется в пределах от 1,2 до 2,5 нм, продольный размер частиц – от 15 до 32 нм (рис. 3, з).

Установлено, что комплексная обработка привела к формированию поверхностного слоя толщиной до 70 мкм (рис. 4), микротвердость которого в три раза превышает микротвердость исходного материала и в 1,3 раза микротвердость стали после азотирования.

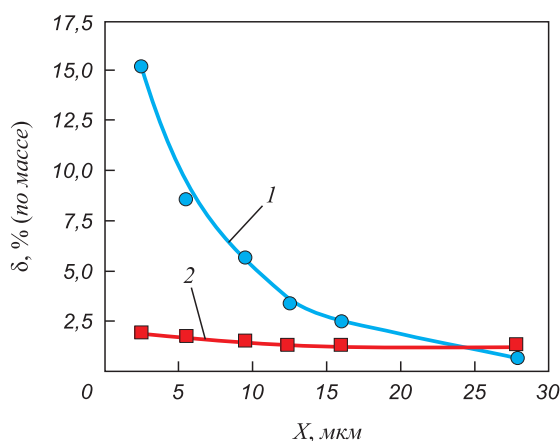


Рис. 1. Зависимость концентрации алюминия (1) и хрома (2) от расстояния от поверхности алитирования стали 40Х

Fig. 1. Dependence of aluminum (1) and chromium (2) concentrations on distance from aluminizing surface of 40Cr steel

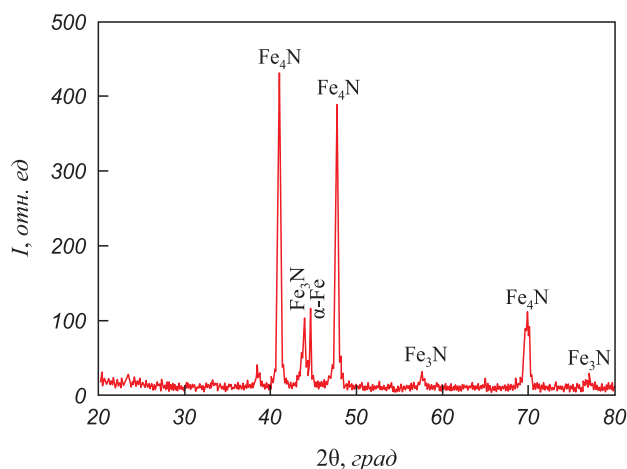


Рис. 2. Фрагмент рентгенограммы, полученной с поверхности стали 40Х, подвергнутой комплексной обработке (алитирование и последующее азотирование)

Fig. 2. X-ray section obtained from 40Cr steel surface after complex treatment (aluminizing and consequent nitriding)

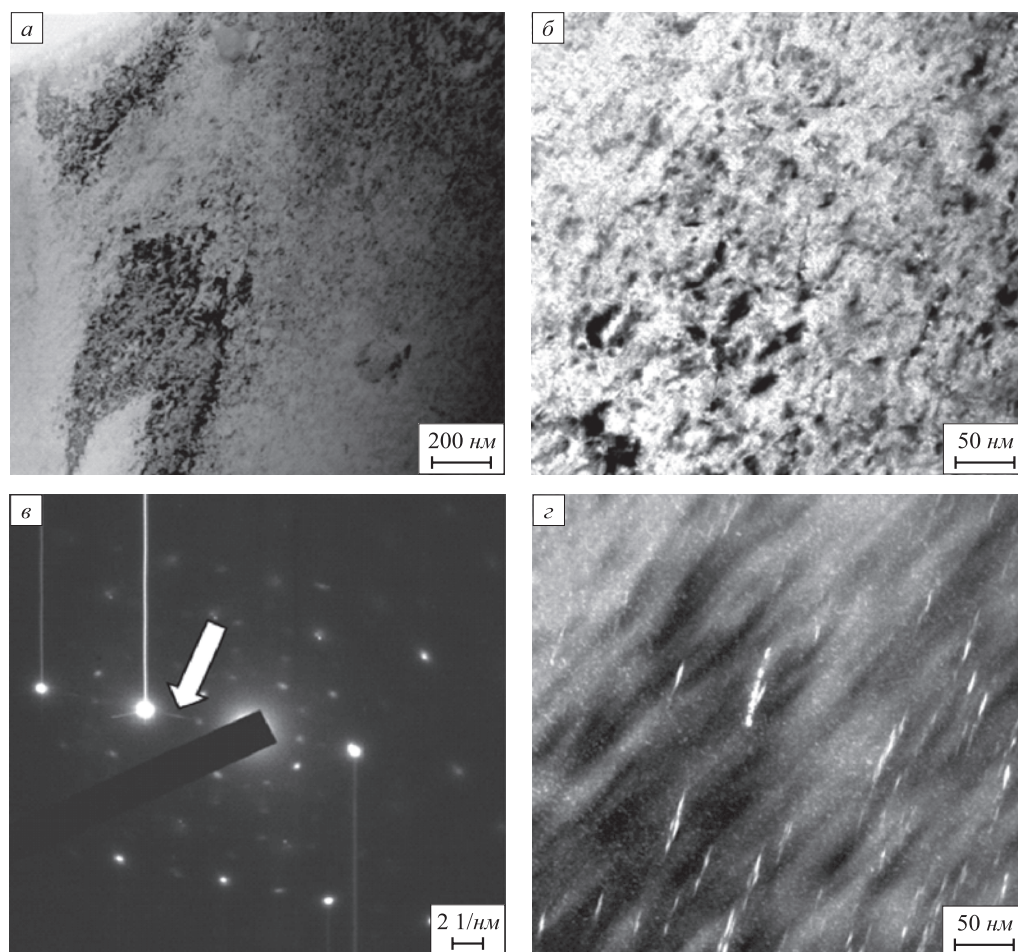


Рис. 3. ПЭМ-изображение частиц второй фазы, формирующихся в объеме зерен стали 40Х в результате комплексной обработки:
а, б – светлое поле; в – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле);
г – темное поле, полученное в рефлексе $[330] \text{Al}_3\text{Cr}_4$

Fig. 3. TEM images of second phase particles formed in the grain bulk of 40Cr steel after complex treatment:
а, б – bright field; в – microdiffraction pattern (arrow indicates the reflection in which dark field was obtained);
г – dark field obtained in $[330] \text{Al}_3\text{Cr}_4$ reflection

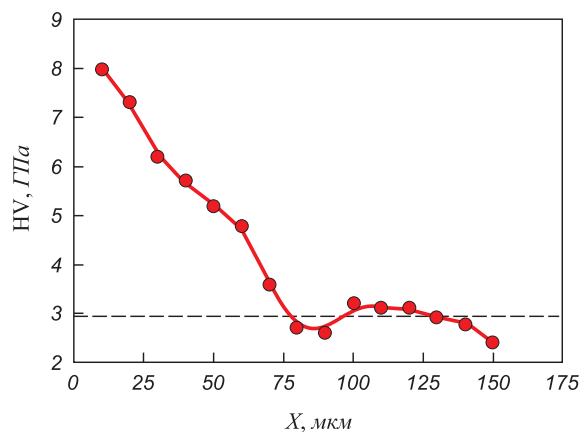


Рис. 4. Профиль микротвердости образцов стали 40Х, подвергнутых комплексной обработке, сочетающей алитирование и последующее азотирование (штриховой линией обозначена твердость стали в исходном состоянии)

Fig. 4. Microhardness profile of 40Cr steel samples after complex treatment including aluminizing and consequent nitriding (dotted line – microhardness of steel in initial state)

Показано, что модифицирование приводит к снижению износостойкости стали (рис. 5), что может быть обусловлено хрупким разрушением поверхностного слоя и участием частиц твердой фазы в виде абразивного порошка в процессе износа материала. Коэффициент трения (μ) практически не изменяется и находится в пределах от 0,49 до 0,51.

Выводы

Комплексное модифицирование образцов легированной стали 40Х, заключающееся в алитировании и последующем азотировании, выполненное в едином вакуумном пространстве, осуществляли на ионно-плазменной установке «ТРИО» с размерами камеры $600 \times 600 \times 600 \text{ мм}^3$. Алитирование проводили при температуре 963 К в течение 4 ч. Последующее азотирование алитированного слоя проводили при температуре 803 К в течение 2 ч. Установка была оснащена двумя плазмофизическими устройствами для генерации газовой

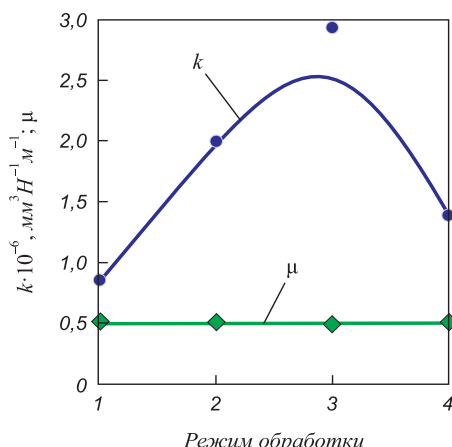


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения (μ) и параметра износа (k) от режима обработки стали 40X

Fig. 5. Dependences of friction coefficient (μ) and wear rate (k) on the treatment mode of 40Cr steel

(«ПИНК») и металлической (электродуговой испаритель) плазмы. Катод дугового испарителя был изготовлен из алюминиевого сплава А7 (98,8 % Al). Особен-

ностью работы системы была возможность реализации элионного режима работы, который обеспечивает эффективный подогрев обрабатываемых образцов электронной компонентой плазмы без ионного травления их поверхности. Установлено, что сталь 40X в состоянии перед алитированием (исходное состояние) является поликристаллическим агрегатом, сформированным зернами феррита и зернами перлита пластинчатой морфологии. Показано, что комплексное модифицирование стали приводит к формированию поверхностного слоя, размеры зерен которого изменяются в пределах 1,0–2,5 мкм. Выявлено формирование в модифицированном слое многофазного субмикро- и наноструктурного состояния, содержащего нитриды алюминия, нитриды и алюминиды железа и хрома. Установлено, что комплексное модифицирование стали сопровождается формированием упрочненного поверхностного слоя толщиной до 70 мкм. Твердость стали максимальна на поверхности обработки и превышает твердость исходного материала в три раза. Износостойкость стали в условиях сухого трения после комплексного модифицирования снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Faye D.Nd., Dias M., Rojas-Hernandez R.E., Sousa N., Santos L.F., Almeida R.M., Alves E. Structural and optical studies of aluminosilicate films doped with (Tb³⁺, Er³⁺)/Yb³⁺ by ion implantation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2019. Vol. 459. P. 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.08.027>
2. Kuang X., Li L., Wang L., Li G., Huang K., Xu Y. The effect of N⁺ ion-implantation on the corrosion resistance of HiPIMS-TiN coatings sealed by ALD-layers // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 374. P. 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.055>
3. Vorob'ev V.L., Gilmudinov F.Z., Bykov P.V., Bayankin V.Ya., Pospelova I.G., Russkikh I.T. Nanoscale layers formed on the surface of a titanium alloy by the ion-beam mixing of carbon with a substrate // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2019. Vol. 13. No. 5. P. 979–984. <https://doi.org/10.1134/S1027451019050379>
4. Boes J., Röttger A., Becker L., Theisen W. Processing of gas-nitrided AISI 316L steel powder by laser powder bed fusion – Microstructure and properties // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 30. Article 100836. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100836>
5. Ren Z., Eppell S., Collins S., Ernst F. Co–Cr–Mo alloys: Improved wear resistance through low-temperature gas-phase nitro-carburization // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 378. Article 124943. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124943>
6. Boblyov E. Diffusion saturation from fusible liquid metal media solutions by titanium of TK and WC-Co alloys as way to increase of tool durability // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 450. No. 3. Article 032019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032019>
7. Sokolov A.G., Boblyov E.E. Diffusion saturation by titanium from liquid-metal media as way to increase carbide-tipped tool life // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. P. 181–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.181>
8. Sridharan N., Isheim D., Seidman D.N., Babu S.S. Colossal super saturation of oxygen at the iron-aluminum interfaces fabricat-
1. Faye D.Nd., Dias M., Rojas-Hernandez R.E., Sousa N., Santos L.F., Almeida R.M., Alves E. Structural and optical studies of aluminosilicate films doped with (Tb³⁺, Er³⁺)/Yb³⁺ by ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2019, vol. 459, pp. 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.08.027>
2. Kuang X., Li L., Wang L., Li G., Huang K., Xu Y. The effect of N⁺ ion-implantation on the corrosion resistance of HiPIMS-TiN coatings sealed by ALD-layers. *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 374, pp. 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.055>
3. Vorob'ev V.L., Gilmudinov F.Z., Bykov P.V., Bayankin V.Ya., Pospelova I.G., Russkikh I.T. Nanoscale layers formed on the surface of a titanium alloy by the ion-beam mixing of carbon with a substrate. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2019, vol. 13, no. 5, pp. 979–984. <https://doi.org/10.1134/S1027451019050379>
4. Boes J., Röttger A., Becker L., Theisen W. Processing of gas-nitrided AISI 316L steel powder by laser powder bed fusion – Microstructure and properties. *Additive Manufacturing*. 2019, vol. 30, article 100836. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100836>
5. Ren Z., Eppell S., Collins S., Ernst F. Co–Cr–Mo alloys: Improved wear resistance through low-temperature gas-phase nitro-carburization. *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 378, article 124943. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124943>
6. Boblyov E. Diffusion saturation from fusible liquid metal media solutions by titanium of TK and WC-Co alloys as way to increase of tool durability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 453, no. 3, article 032019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032019>
7. Sokolov A.G., Boblyov E.E. Diffusion saturation by titanium from liquid-metal media as way to increase carbide-tipped tool life. *Solid State Phenomena*. 2017, vol. 265, pp. 181–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.181>
8. Sridharan N., Isheim D., Seidman D.N., Babu S.S. Colossal super saturation of oxygen at the iron-aluminum interfaces fabri-

- ed using solid state welding // *Scripta Materialia*. 2017. Vol. 130. P. 196–199. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.11.040>
9. Barda H., Rabkin E. The role of interface diffusion in solid state dewetting of thin films: The nano-marker experiment // *Acta Materialia*. 2019. Vol. 177. P. 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.07.042>
10. Konusova F., Pavlov S., Lauka A., Tarbikov V., Karpov S., Karpov V., Gadirov R., Kashkarov E., Remnev G. Effect of short-pulsed 200 keV C^{+} ion beam and continuous 350 keV He^{2+} ion beam irradiation on optical properties of Al-Si-N coatings with a various Si content // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 389. P. 125564. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125564>
11. Капуткина Л.М., Медведев М.Г., Прокошкина В.Г., Смарикина И.В., Свяжин А.Г. Влияние легирования азотом на упрочнение и стабильность аустенита стали типа X18H10 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 7. С. 43–50. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-7-43-50>
12. Рогачев С.О., Стомахин А.Я., Никулин С.А., Кадач М.В., Хаткевич В.М. Структура и механические свойства аустенитных Cr–Ni–Ti сталей после высокотемпературного азотирования // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 5. С. 366–373. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-366-373>
13. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 8. С. 578–582. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-578-582>
14. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.М. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
15. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов / Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. М.: Круглый стол, 2001. 528 с.
16. Cherenda N.N., Shymanski V.I., Uglov V.V., Astashinskii V.M., Kuz'mitskii A.M., Koval' N.N., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Formation of zirconium–titanium solid solutions under the action of compression plasma flows and high-current electron beams // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2012. Vol. 3. No. 5. P. 365–370. <https://doi.org/10.1134/S2075113312050024>
17. Ivanov Yu.F., Akhmadeev Yu.H., Lopatin I.V., Petrikova E.A., Denisova Yu.A., Teresov A.D., Krygina O.V. Complex beam-plasma surface treatment of high-chromium steel // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1115. No. 3. Article 032031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032031>
18. Devyatkov V.N., Ivanov Yu.F., Krygina O.V., Koval' N.N., Petrikova E.A., Shugurov V.V. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering // *Vacuum*. 2017. Vol. 143. P. 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.04.016>
19. Полетика И.М., Крылова Т.А., Тетюцкая М.В. Структура и свойства наплавленных покрытий с наноструктурированным поверхностным слоем // *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2014 Т. 57. № 10. С. 51–57. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-10-51-57>
20. Марков А.Б., Яковлев Е.В., Шепель Д.А., Соловьев А.В., Петров В.И. Электронно-пучковый синтез поверхностного сплава путем облучения многослойного Ni–Al-покрытия // *Известия вузов. Физика*. 2019. Т. 62. № 7. С. 191–198. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/7/191>
21. Markov A., Yakovlev E., Shepel' D., Bestetti M. Synthesis of a Cr–Cu surface alloy using a low-energy high-current electron beam // *Results in Physics*. 2019. Vol. 12. P. 1915–1924. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.010>
22. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Комплексная электронно-ионно-плазменная обработка поверхности алюминия в едином вакуумном цикле // *Известия вузов. Физика*. 2019. № 7. С. 59–68. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/7/59>
23. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Десятков В.Н., Шугуров В.В., Тересов А.Д., Петрикова Е.А. Развитие комплексного электронно-ионно-плазменного метода модификации поверхности материалов и изделий // *Известия вузов. Физика*. 2020. Т. 63. № 1. С. 174–183. <https://doi.org/10.17223/00213411/63/1/174>
- cated using solid state welding. *Scripta Materialia*. 2017, vol. 130, pp. 196–199. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.11.040>
9. Barda H., Rabkin E. The role of interface diffusion in solid state dewetting of thin films: The nano-marker experiment. *Acta Materialia*. 2019, vol. 177, pp. 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.07.042>
10. Konusova F., Pavlov S., Lauka A., Tarbikov V., Karpov S., Karpov V., Gadirov R., Kashkarov E., Remnev G. Effect of short-pulsed 200 keV C^{+} ion beam and continuous 350 keV He^{2+} ion beam irradiation on optical properties of Al-Si-N coatings with a various Si content. *Surface and Coatings Technology*. 2020, vol. 389, article 125564. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125564>
11. Kaputkina L.M., Medvedev M.G., Prokoshkina V.G., Smarygina I.V., Svyazhin A.G. Influence of nitrogen alloying at strengthening and stability of austenite steel type Cr18Ni10. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 7, pp. 43–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-7-43-50>
12. Rogachev S.O., Stomakhin A.Ya., Nikulin S.A., Kadach M.V., Khatkevich V.M. Structure and mechanical properties of austenitic Cr–Ni–Ti steels after high-temperature nitriding. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 366–373. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-366-373>
13. Gur'ev A.M., Ivanov S.G., Gur'ev M.A., Chernykh E.V., Ivanova T.G. Thermochemical treatment of the materials for cutting tools. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 8, pp. 578–582. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-578-582>
14. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.M. *Chemical-Thermal Treatment of Metals*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 256 p. (In Russ.).
15. Gribkov V.A., Grigor'ev F.I., Kalin B.A., Yakushin V.L. *Perspective Radiation-Beam Technologies of Materials Treatment. Textbook*. Moscow: Kruglyi stol, 2001, 528 p. (In Russ.).
16. Cherenda N.N., Shymanski V.I., Uglov V.V., Astashinskii V.M., Kuz'mitskii A.M., Koval' N.N., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Formation of zirconium–titanium solid solutions under the action of compression plasma flows and high-current electron beams. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2012, vol. 3, no. 5, pp. 365–370. <https://doi.org/10.1134/S2075113312050024>
17. Ivanov Yu.F., Akhmadeev Yu.H., Lopatin I.V., Petrikova E.A., Denisova Yu.A., Teresov A.D., Krygina O.V. Complex beam-plasma surface treatment of high-chromium steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1115, no. 3, article 032031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032031>
18. Devyatkov V.N., Ivanov Yu.F., Krygina O.V., Koval' N.N., Petrikova E.A., Shugurov V.V. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering. *Vacuum*. 2017, vol. 143, pp. 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.04.016>
19. Poletika I.M., Krylova T.A., Tetyutska M.V. Structure and properties of deposited coatings with the nano-structured surface layer. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 10, pp. 51–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-10-51-57>
20. Markov A.B., Yakovlev E.V., Shepel' D.A., Solov'ev A.V., Petrov V.I. The synthesis of Ni–Al surface alloy by low-energy, high-current electron beam irradiation of composite coating. *Russian Physics Journal*. 2019, vol. 62, pp. 1298–1305. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01847-0>
21. Markov A., Yakovlev E., Shepel' D., Bestetti M. Synthesis of a Cr–Cu surface alloy using a low-energy high-current electron beam. *Results in Physics*. 2019, vol. 12, pp. 1915–1924. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.010>
22. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Complex electron-ion-plasma processing of aluminum surface in a single vacuum cycle. *Russian Physics Journal*. 2019, vol. 62, pp. 1161–1170. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01831-8>
23. Koval' N.N., Ivanov Yu.F., Devyatkov V.N., Shugurov V.V., Teresov A.D., Petrikova E.A. Development of a combined electron-ion-plasma method of surface modification of materials and products. *Russian Physics Journal*. 2021, vol. 63, pp. 1829–1838. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02240-6>

24. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. Новосибирск: ВО Наука, 1993. 280 с.
25. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Окишев К.Ю., Табачникова Т.И., Хлебникова Ю.В. Перлит в углеродистых сталях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 312 с.
24. Tushinskii L.I., Bataev A.A., Tikhomirova L.B. *Structure of Pearlite and Construction Strength of Steel*. Novosibirsk: VO Nauka, 1993, 280 p. (In Russ.).
25. Schastlivtsev V.M., Mirzaev D.A., Yakovleva I.L., Okishev K.Yu., Tabatchikova T.I., Khlebnikova Yu.V. *Pearlite in Carbon Steel*. Yekaterinburg: UB RAS, 2006, 312 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Юрий Халяфович Ахмадеев, к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники СО РАН
ORCID: 0000-0001-8084-2854
E-mail: ahmadeev@opee.hcei.tsc.ru

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

Ольга Васильевна Крысина, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники СО РАН
ORCID: 0000-0001-9265-2644
E-mail: krysinina_82@mail.ru

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

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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

Yurii Ch. Akhmadeev, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-8084-2854
E-mail: ahmadeev@opee.hcei.tsc.ru

Il'ya 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

Ol'ga V. Krysinina, 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: 0000-0001-9265-2644
E-mail: krysinina_82@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

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ю. Ф. Иванов – исследования структурно-фазового состояния стали методами провечивающей электронной дифракционной микроскопии, обсуждение полученных результатов, написание статьи.

Ю. Х. Ахмадеев – комплексная обработка стали, участие в обсуждении полученных результатов, написание статьи.

И. В. Лопатин – комплексная обработка стали, участие в обсуждении полученных результатов, написание статьи.

О. В. Крысина – исследования структурно-фазового состояния стали методами рентгенофазового анализа, механические испытания стали (определение микротвердости), обсуждение полученных результатов, написание статьи.

Е. А. Петрикова – исследования структурно-фазового состояния стали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, трибологические испытания стали (определение износостойкости и коэффициента трения), обсуждение полученных результатов, написание статьи.

Yu. F. Ivanov – studies of steel structural-phase state by methods of conducting electron diffraction microscopy, discussion of the results, writing the article.

Yu. Kh. Akhmadeev – complex processing of steel, discussion of the results, writing the article.

I. V. Lopatin – complex processing of steel, discussion of the results, writing the article.

O. V. Krysinina – studies of steel structural-phase state by x-ray diffraction, mechanical testing of steel (definition of microhardness), discussion of the results, writing the article.

E. A. Petrikova – studies of steel structural-phase state by optical and scanning electron microscopy, tribological testing of steel (determination of wear resistance and friction coefficient), discussion of the results, writing the article.

Поступила в редакцию 30.07.2021
 После доработки 27.08.2021
 Принята к публикации 27.09.2021

Received 30.07.2021
 Revised 27.08.2021
 Accepted 27.09.2021