

**Оригинальная статья**

УДК 536.42:539.25:538.331

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-92-102

**ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ОБРАБОТКА ДИФФУЗИОННЫХ  
БОРОАЛИТИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 5ХНМ**

© 2024 г. Н. С. Улаханов<sup>1</sup>, У. Л. Мишигдоржийн<sup>1</sup>, А. П. Семенов<sup>1</sup>, А. С. Милонов<sup>1</sup>,  
М. С. Воробьев<sup>2</sup>, П. В. Москвин<sup>2,1</sup>, В. И. Шин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физического материаловедения Сибирского Отделения РАН (Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского Отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

**Аннотация.** Рассмотрено упрочнение поверхности образцов из штамповой стали 5ХНМ комбинированным методом, заключающимся в последовательном проведении химико-термической обработки с последующей модификацией полученного диффузионного слоя с помощью импульсной электронно-пучковой обработки с использованием источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Электронно-пучковую обработку проводили в экспериментальной установке «СОЛО», входящей в перечень уникальных электрофизических установок России. Представлены результаты локальной структурно-фазовой трансформации диффузионных бороалитированных слоев за счет скоростного нагрева электронным пучком миллисекундной длительности. Проведен сравнительный анализ строения диффузионного слоя после химико-термической обработки и последующей модификации слоя импульсным электронным пучком. Изучена микротвердость, проведена оценка фазового состояния диффузионного слоя до и после электронно-пучкового воздействия. Электронно-пучковая обработка диффузионного слоя приводит к повышению микротвердости, максимальное значений которой достигает 1400 HV, и к снижению шероховатости поверхности по параметру Ra (до семи раз). После электронно-пучковой обработки диффузионного слоя формируются фаза Fe<sub>2</sub>B, интерметаллидные фазы FeAl, Fe<sub>2</sub>AlCr, CrSi<sub>2</sub>, обладающие высокой жаростойкостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью.

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, бороалитирование, импульсная электронно-пучковая обработка, сталь, микротвердость, наноструктурирование, регулировка мощности электронного пучка

**Благодарности:** авторы выражают признательность научному сотруднику Иркутского национального исследовательского технического университета А.Г. Тихонову за помощь в исследовании топографии поверхности

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10163-П).

**Для цитирования:** Улаханов Н.С., Мишигдоржийн У.Л., Семенов А.П., Милонов А.С., Воробьев М.С., Москвин П.В., Шин В.И. Электронно-пучковая обработка диффузионных бороалитированных слоев на поверхности стали 5ХНМ. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):92–102. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-92-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-92-102)

*Original article*

## ELECTRON BEAM PROCESSING OF DIFFUSION BOROALUMINIZING LAYERS ON THE SURFACE OF STEEL 5KHNM

© 2024 N. S. Ulakhanov<sup>1</sup>, U. L. Mishigdorzhii<sup>1</sup>, A. P. Semenov<sup>1</sup>, A. S. Milonov<sup>1</sup>, M. S. Vorob'ev<sup>2</sup>, P. V. Moskvina<sup>2,1</sup>, V. I. Shin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (6 Sakhyanova str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation)*

<sup>2</sup>*Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)*

**Abstract.** The hardening of the surface of samples made of die steel 5KhNM by a combined method is considered, which consists of sequential thermal-chemical treatment (TCT) followed by modification of the resulting diffusion layer using pulsed electron beam processing using an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge. Electron beam processing was carried out in the SOLO experimental installation, which is included in the list of unique electrophysical installations in Russia. The results of local structural-phase transformation of diffusion boroaluminizing layers due to high-speed heating by an electron beam of millisecond duration are presented. A comparative analysis of the structure of the diffusion layer after thermal-chemical treatment and subsequent modification of the layer with a pulsed electron beam was carried out. Microhardness was studied, and the phase state of the diffusion layer was assessed before and after electron beam exposure. Electron beam treatment (EBT) of the diffusion layer leads to an increase in micro-hardness values, the maximum value of which reaches 1400 HV, and to a decrease in surface roughness values in the *Ra* parameter (up to seven times). After electron beam treatment of the diffusion layer, the Fe<sub>2</sub>B phase and intermetallic phases FeAl, Fe<sub>2</sub>AlCr, CrSi<sub>2</sub> are formed, which have high heat resistance, wear resistance and corrosion resistance.

**Keywords:** thermal-chemical treatment, boroaluminizing, pulsed electron beam processing, steel, microhardness, nanostructuring, regulation of electron beam power

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the research fellow of the Irkutsk National Research Technical University A.G. Tikhonov for assistance in studying surface topography.

**Funding.** The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project no. 19-79-10163-P).

**For citation:** Ulakhanov N.S., Mishigdorzhii U.L., Semenov A.P., Milonov A.S., Vorob'ev M.S., Moskvina P.V., Shin V.I. Electron beam processing of diffusion boroaluminizing layers on the surface of steel 5KHNM. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):92–102. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-92-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-92-102)

### Введение

В машиностроении для производства формообразующих инструментов (литейных форм и штампов), работающих в условиях высоких механических и тепловых воздействий, используют специальные легированные стали [1]. Иногда рабочие поверхности формообразующих инструментов нуждаются в дополнительном упрочнении, например, при литье под давлением штампы выходят из строя из-за образования поверхностных трещин, вызванных градиентом рабочих температур [2]. Именно поэтому в машиностроении активно разрабатываются новые методы повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей инструментальных сталей.

Один из классических методов повышения поверхностных свойств – химико-термическая

обработка (ХТО), которая позволяет улучшить физико-механические свойства инструментальных сталей при низкой себестоимости процесса. Боридные диффузионные покрытия повышают твердость [3, 4], увеличивают износостойкость [5], термостойкость [6] и защищают от коррозии и окисления [7]. В машиностроении также используют многокомпонентную ХТО, которая заключается в одновременном или последовательном насыщении поверхности несколькими химическими элементами [8]. Бороалитирование – один из комплексных методов ХТО, который существенно увеличивает сопротивление износу и повышает жаростойкость, коррозионную стойкость и улучшает другие свойства поверхностных слоев деталей машин [9].

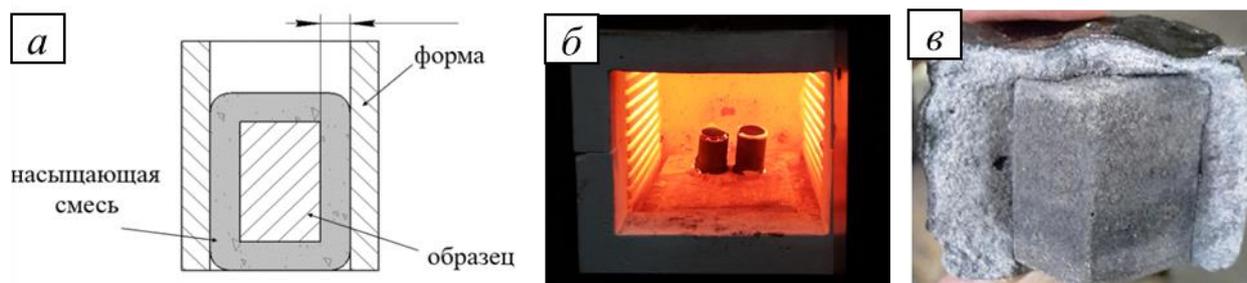


Рис. 1. Схема упаковки (а) и обработки в муфельной печи (б) образцов, а также внешний вид образцов после ХТО (в)  
 Fig. 1. Scheme of packing (a) and processing in a muffle furnace (б) of samples, as well as the appearance of samples after TCT (в)

Существует возможность эффективно обрабатывать поверхность металлов и сплавов с помощью концентрированных потоков энергии (КПЭ), таких как электронно-лучевое (пучковое) воздействие, отличающееся от традиционной ХТО тем, что используется кратковременное высокоэнергетическое воздействие на поверхность материала и при этом значительно повышаются функциональные свойства.

В современных исследованиях продемонстрированы результаты применения электронных пучков совместно с другими технологиями, такими как электродуговая и электроконтактная проволоочная наплавка [10], модификация поверхностных слоев аддитивно изготовленных изделий [11], поверхностное легирование [12], комбинация применения плазменных потоков с последующим низкоэнергетическим сильноточным электронным пучковым воздействием [13]. В результате обработки электронными пучками высокой плотности на поверхности обрабатываемых сталей и сплавов происходит высокоскоростная рекристаллизация, отжиг, пластическая деформация и улучшение топографии поверхности [14]. В работе [15] отмечается перспективность обработки высокоточным электронным пучком с целью удаления дефектов высокоэнтропийного сплава (ВЭС) NiCoCrAlYSi, полученного лазерной наплавкой. Установлено, что оптимальные режимы обработки электронным пучком значительно повышают износостойкость, микротвердость, модуль Юнга и снижают коэффициент трения [11]. Возможность комбинированной обработки, сочетающей традиционную ХТО и электронно-пучковую обработку (ЭПО), в литературе отражена недостаточно.

Цель настоящей работы – исследование влияния импульсного электронно-пучкового воздействия на диффузионный слой на основе бора и алюминия, сформированного химико-термической обработкой на штамповой стали марки 5ХНМ. В работе используются уникальные возможности источников электронов с

плазменным катодом, которые обеспечивают высокую плотность энергии и возможность регулировки мощности пучка в течение субмиллисекундной длительности импульса тока пучка.

### Материалы и методы исследования

Химико-термическую обработку проводили в насыщающих пастах [16], содержащих в качестве активатора порошки из карбида бора, алюминия и фторида натрия: 80 % В<sub>4</sub>С + 17 % Al + 3 % NaF (по массе). Для получения пастообразной композиции порошки были предварительно замешаны с использованием органического клея. Далее образцы из штамповой стали марки 5ХНМ помещали в прямоугольные формы вместе с пастой и утрамбовывали (рис. 1). После удаления форм полученные брикеты просушивали при температуре 50 – 100 °С в течение 2 ч. Затем брикеты загружали в нагретую до температуры обработки печь и выдерживали в течение 2 ч при температуре 950 °С. Охлаждение образцов проводили на спокойном воздухе при комнатной температуре.

Электронно-пучковую обработку диффузионного слоя проводили на установке «СОЛО» (рис. 2, а) с применением источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления [17]. Установка «СОЛО» создана в Институте сильноточной электроники СО РАН и входит в Комплекс уникальных электрофизических установок России «УНИКУМ» [18] и дооснащена специализированным блоком питания, позволяющим изменять ток разряда плазменного катода в течение импульса субмилли- и миллисекундной длительности [19]. На рис. 2, б показана структурная схема обработки образцов в импульсной электронно-пучковой установке.

Электронно-пучковую обработку проводили в среде аргона при давлении в вакуумной камере 0,035 Па в магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 18 кэВ, диаметр пучка электронов 3 см.

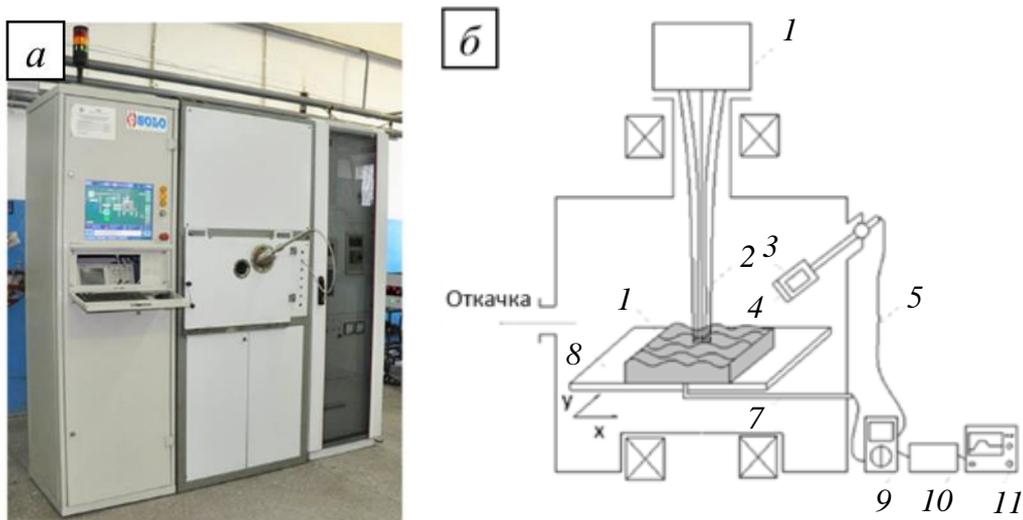


Рис. 2. Внешний вид установки «СОЛО» (а) и схема обработки образцов (б):  
 1 – источник электронов; 2 – электронный пучок; 3 – объектив; 4 – кварцевое стекло; 5 – оптоволоконный кабель;  
 6 – образец; 7 – термопара; 8 – стол-манипулятор; 9 – мультиметр; 10 – высокоскоростной инфракрасный пирометр; 11 – осциллограф

Fig. 2. External view of the «SOLO» installation (a) and sample processing scheme (b):

1 – plasma electron source; 2 – electron beam; 3 – objective; 4 – quartz glass; 5 – fiber optic cable; 6 – sample; 7 – thermocouple; 8 – manipulator table; 9 – multimeter; 10 – high-speed infrared pyrometer; 11 – oscilloscope

Ток пучка изменялся в течение импульса длительностью 950 мкс в пределах 20 – 120 А для обеспечения и удержания температуры 1800 – 2100 °С на поверхности образца через 150 мкс. Поверхность образцов подвергали трем импульсам воздействия, интервал времени между которыми составлял 3 с. Характерные осциллограммы представлены на рис. 3.

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «МЕТАМ РВ-34» с цифровой камерой «Altami Studio». Элементный состав исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments в

Центре коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». Определение микротвердости полученных слоев осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3М. Нагрузка составляла 0,49 Н.

Топография поверхности опытных образцов была исследована на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 в «Иркутском национальном исследовательском техническом университете». Метод измерения – вертикальная сканирующая интерферометрия (в белом свете) и фазовая интерферометрия.

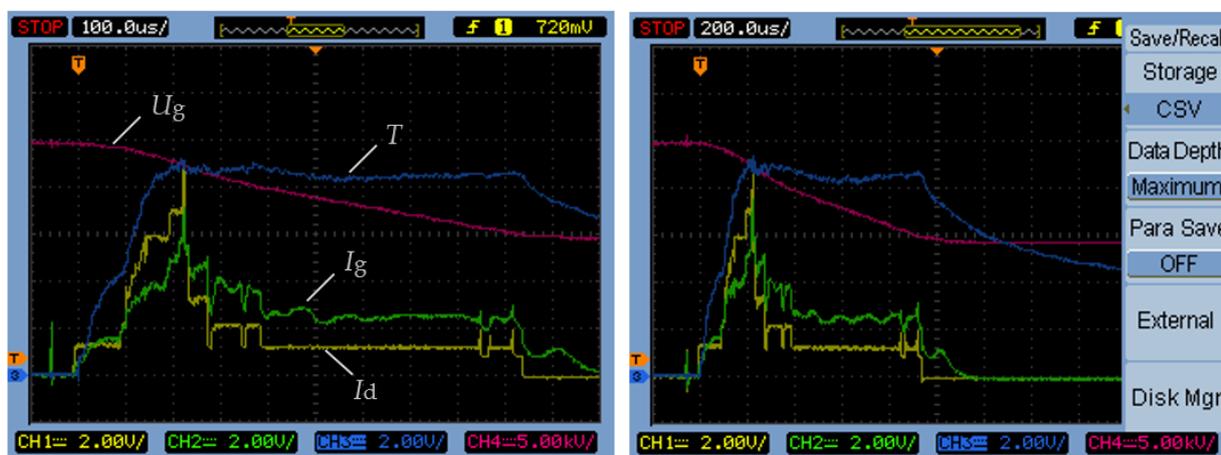


Рис. 3. Характерные осциллограммы тока разряда плазменного катода ( $I_d$ , 40 А/клетка), тока в ускоряющем промежутке ( $I_g$ , 40 А/клетка), ускоряющего напряжения ( $U_g$ , 5 кВ/клетка) и температуры ( $T$ , 400 °С/клетка+ 300 °С)

Fig. 3. Typical oscillograms of the plasma cathode discharge current ( $I_d$ , 40 A/cell), current in the accelerating gap ( $I_g$ , 40 A/cell), accelerating voltage ( $U_g$ , 5 kV/cell) and temperature ( $T$ , 400 °C/cell + 300 °C)

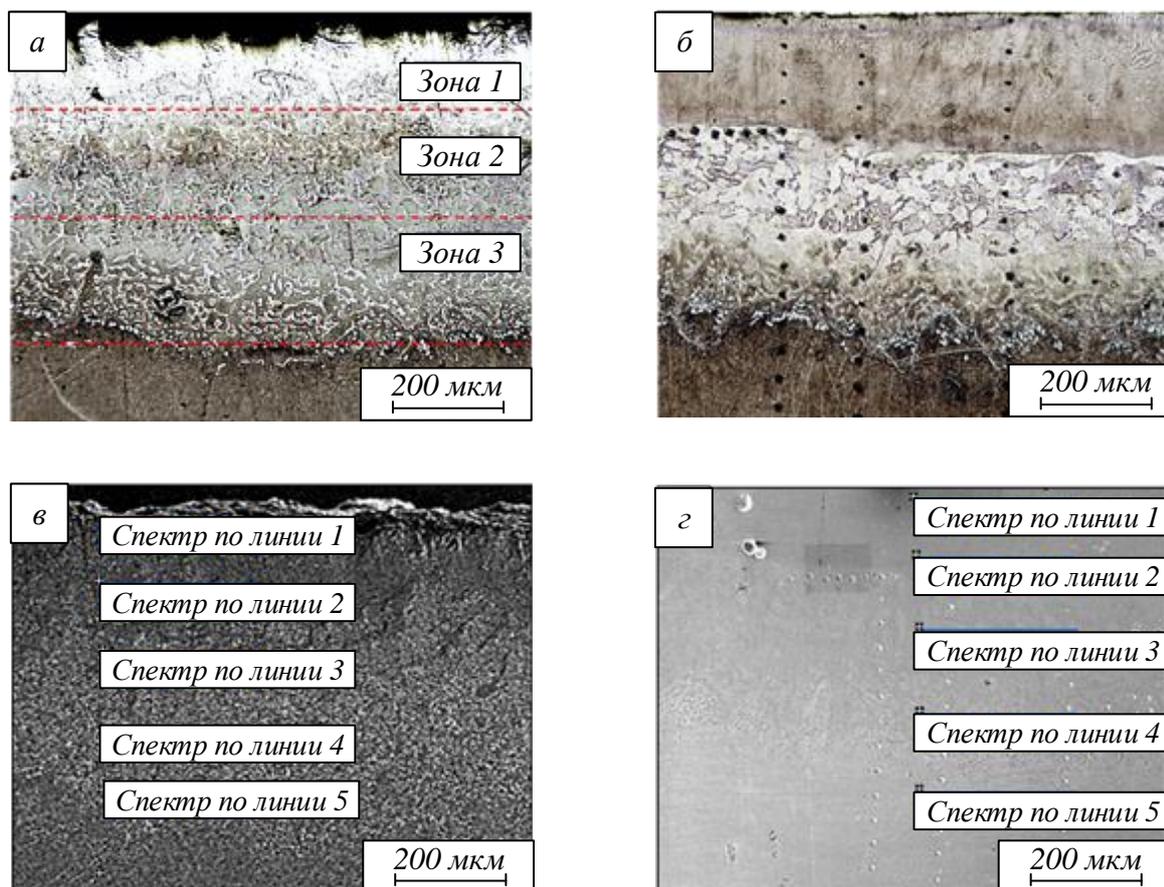


Рис. 4. Структура диффузионного слоя:

*a* – оптическое изображение ДС после ХТО; *б* – оптическое изображение ДС после ЭПО; *в* – изображение участков анализа ДС во вторичных электронах после ХТО; *г* – изображение участков анализа ДС во вторичных электронах после ЭПО

Fig. 4. Structure of the diffusion layer:

*a* – optical image after TCT; *б* – optical image after EBT; *в* – image of areas of diffusion layer analysis in secondary electrons after TCT; *г* – image of areas of diffusion layer analysis in secondary electrons after EBT

### Результаты эксперимента и их обсуждение

В результате ХТО на поверхности стали марки 5ХНМ образовался диффузионный слой (ДС) толщиной до 650 мкм (рис. 4, *a*, *в*), где твердые структурные составляющие (бориды и карбиды)

располагаются в матрице из более пластичных фаз (алюминиды, твердые растворы алюминия и углерода в  $\alpha$ -железе). В зависимости от расстояния от поверхности в диффузионном слое можно выделить несколько структурных зон:

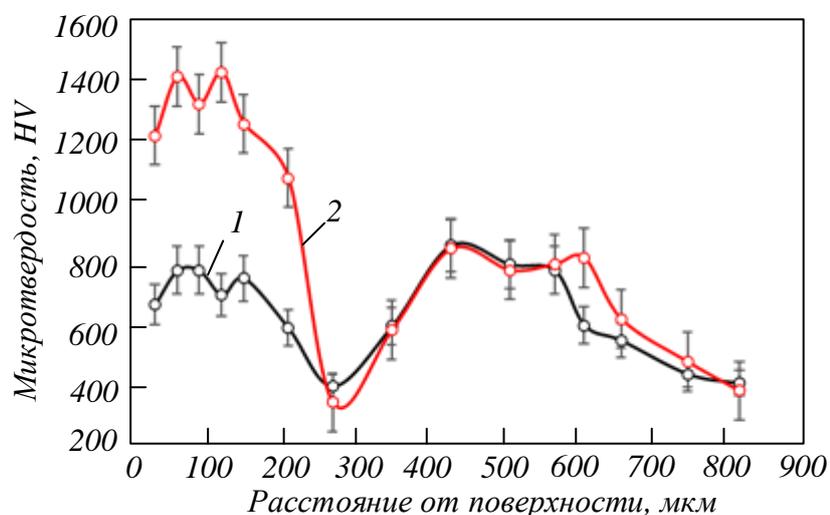


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине слоя после ХТО (1) и после ХТО + ЭПО (2)

Fig. 5. Microhardness distribution by layer depth after CTO (1) and after CTO + EPO (2)

Т а б л и ц а 1

Элементный состав по глубине диффузионного слоя на стали 5ХНМ после ХТО  
 Table 1. Elemental composition according to the depth of the diffusion layer on  
 5KhNM steel after TCT

Спектр по линии	Содержание элемента, %						
	C	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	5,48	8,54	0,35	0,46	0,51	82,78	1,88
2	20,16	7,27	0,27	0,43	0,49	70,06	1,32
3	6,59	7,80	0,35	0,69	0,59	82,83	1,14
4	5,99	5,54	0,57	0,54	0,70	85,68	0,98
5	7,93	0,14	0,12	1,56	0,67	88,81	0,76

верхняя зона 1 состоит из крупных светлых кристаллов; зоны 2 и 3 имеют ячеистую структуру (вторая и третья зоны с преобладанием темных фаз, возможно, ферритными кристаллами, первая зона – с преобладанием светлых фаз) [16].

Обработка диффузионного слоя методом ЭПО приводит к структурной трансформации всего слоя и формированию на глубине до 220 мкм зоны переплава (рис. 4, б, в), характеризующейся ячеистой структурой кристаллизации.

Микротвердость после ХТО составляет примерно 670 HV на поверхности образца, затем наблюдается периодичность изменения значений, которые варьируются в интервале 400 – 860 HV при микротвердости основного металла 350 – 400 HV (рис. 5). Максимальная микротвердость составляет примерно 850 HV на глубине 430 мкм. Такой характер распределения микротвердости по глубине может быть объяснен градиентным распределением бора, алюминия и легирующих элементов из стали-основы [16]. Электронно-пучковая обработка приводит к увеличению микротвердости на поверхности до 1200 HV, максимальное значение 1400 HV достигается на глубине 150 мкм. На глубине более 220 мкм характер распределения микротвердости соответствует диффузионному слою после ХТО.

Концентрация алюминия после ХТО плавно снижается по направлению к основному металлу с 8,54 до 0,14 % (табл. 1). Электронно-пучковая обработка приводит к снижению максимальной концентрации алюминия до 5,81 % (табл. 2). По-

сле ЭПО наблюдается повышение концентрации кремния и хрома, которые коррелируют с результатами рентгенофазового анализа. Так, на поверхности после ХТО формируются следующие фазы: FeB, Fe<sub>2</sub>B, FeAl (рис. 6). Электронно-пучковая обработка диффузионного слоя приводит к формированию на поверхности диборида железа Fe<sub>2</sub>B, интерметаллидных фаз FeAl, Fe<sub>2</sub>AlCr, CrSi<sub>2</sub>, которые обладают высокой жаростойкостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью (рис. 6).

Атомно-силовая микроскопия выявила ячеистую структуру кристаллизации диффузионного слоя после электронно-пучковой обработки (рис. 7, а). Топографическое изображение поверхности характеризуется наличием отдельных крупных частиц округлой формы размером до 2 мкм, выступающих над поверхностью шлифа на высоту (h) более 150 нм, а также множественными включениями, выступающими над поверхностью на высоту 10 – 50 нм (рис. 7, б). Известно, что формирование субмикро- и нанокристаллических структур в модифицированном слое обуславливает высокие механические свойства защитных покрытий [20]. Наличие такой структуры обеспечивает повышенную микротвердость после ЭПО в бороалитированном слое.

Электронно-пучковая обработка по описанным выше режимам приводит к скоростному воздействию на поверхность энергии высокой плотности (до 0,5 МВт/см<sup>2</sup>), вызывая высокоскоростное плавление и рекристаллизацию диффузи-

Т а б л и ц а 2

Элементный состав по глубине диффузионного слоя на стали 5ХНМ после ЭПО  
 Table 2. Elemental composition according to the depth of the diffusion layer on 5KhNM steel after EBT

Спектр по линии	Содержание элемента, %						
	C	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	4,37	5,81	0,42	0,65	0,07	87,16	1,35
2	3,98	4,76	0,48	0,65	0,02	88,86	1,15
3	4,12	2,31	0,27	1,19	0,69	90,40	0,93
4	6,14	2,89	0,31	1,13	1,72	86,21	0,78
5	5,84	0,89	0,33	0,55	0,54	90,59	1,25

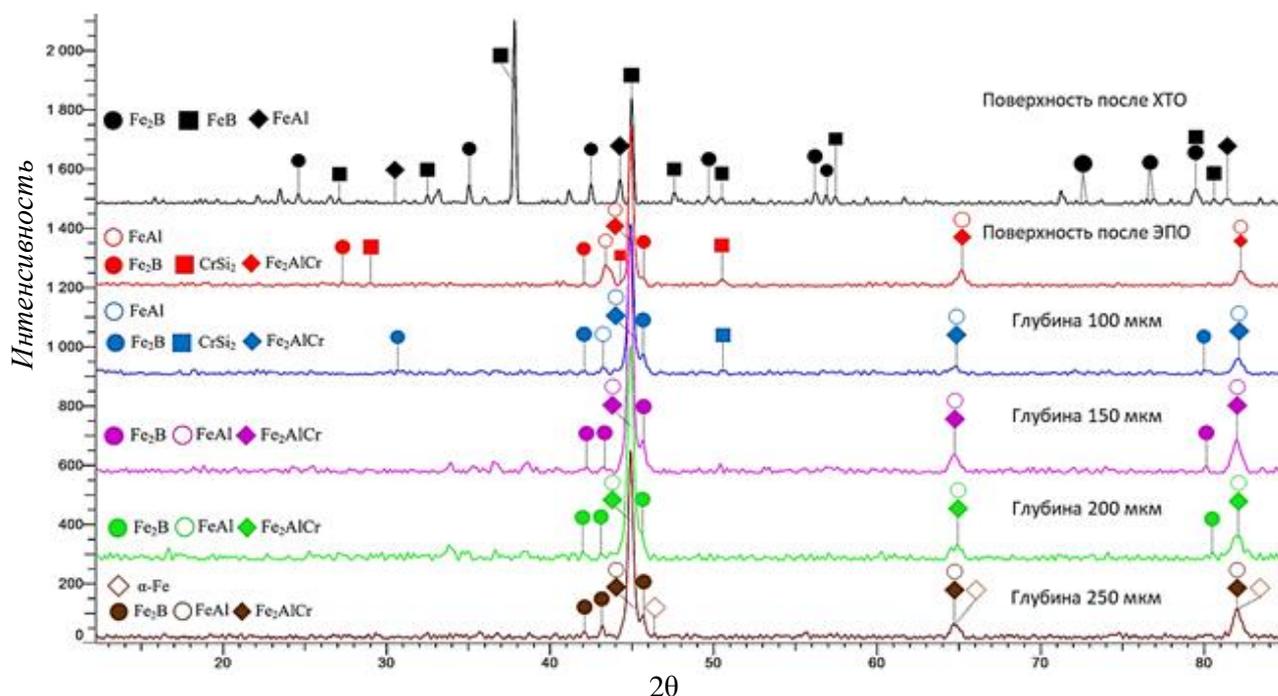


Рис. 6. Рентгенограмма модифицированного слоя  
Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the modified layer

онного слоя на стали марки 5ХНМ глубиной до 220 мкм с изменением топографии поверхности. В результате ХТО происходит изменение микро-рельефа по сравнению с исходным образцом, появлению выступов и других микронеровностей (рис. 8, а.) Так, после ХТО значение  $R_a$  составляет 4,792 мкм, максимальное значение выступов  $R_{max}$  составляет примерно 42 мкм [16]. Электронно-пучковая обработка диффузионного слоя сопровождается плавлением и движением расплава под действием сил поверхностного натяжения и заполнением пор. Шероховатость снижется до  $R_a = 0,157$  мкм, максимальное значение  $R_{max}$  не превышает 0,7 мкм (рис. 8, б).

### Выводы

Электронно-пучковая обработка диффузионного бoroалитированного слоя на стали марки 5ХНМ приводит к изменению структуры слоя в верхней части на глубинт до 220 мкм. Шероховатость значительно снижается по сравнению с ХТО (до семи раз). Такой подход реализует тепловое воздействие на поверхность с высокой плотностью энергии (до 0,5 МВт/см<sup>2</sup>), вызывает быстрое плавление и рекристаллизацию. Длительность импульса электронного пучка составляет несколько сотен микросекунд, что позволяет распространить термический эффект на указанную глубину, не затрагивая основной объем диффузионного слоя, сформированного на этапе ХТО.

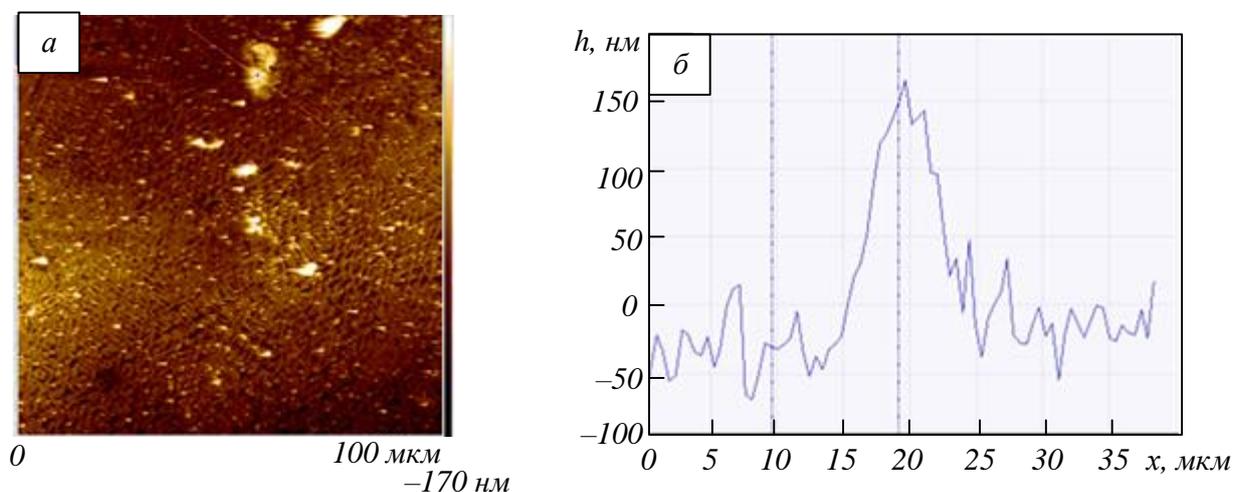


Рис. 7. АСМ-изображение (а) и профиль поверхности (б)  
Fig. 7. AFM images (a) and surface profile (b)

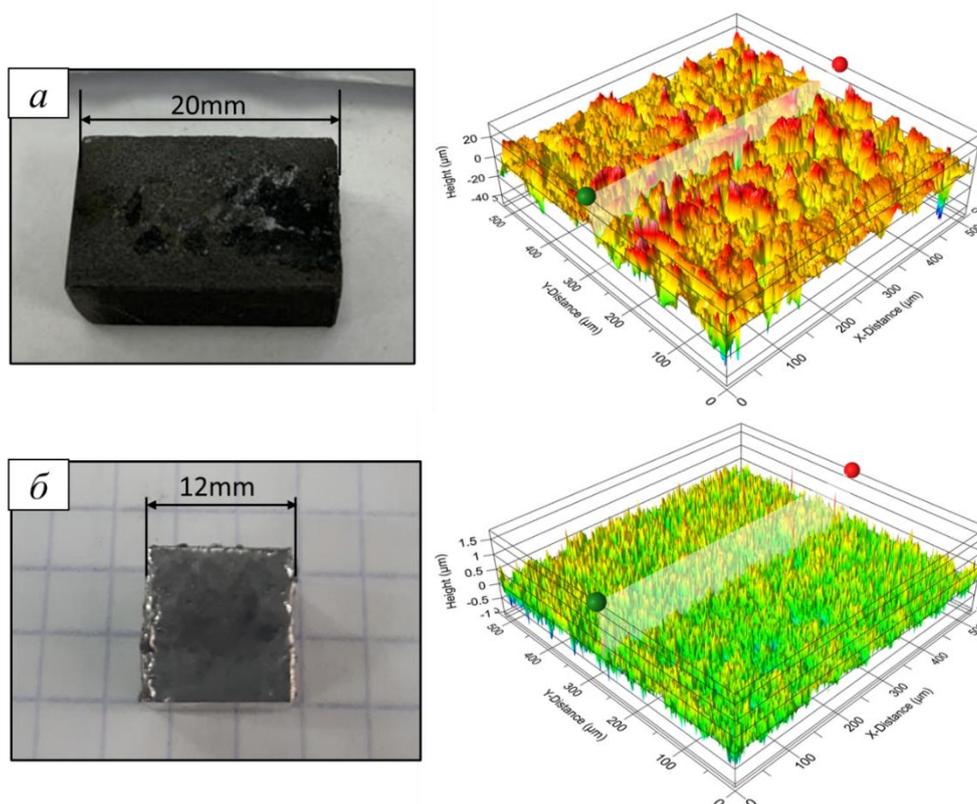


Рис. 8. Топография поверхности после ХТО (а) и после ЭПО (б)  
 Fig. 8. Surface topography after TCT (a) and after EBCT (b)

Электронно-пучковая обработка приводит к формированию заданного фазового состава на поверхности, повышает твердость слоя, что позволяет применять способ комбинированной обработки для стали марки 5ХНМ, используемой для изготовления штамповой оснастки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bao Z.-J., Yang H.-Y., Dong B.-X., Chang F., Li C.-D., Jiang Y., Chen L.-Y., Shu S.-L., Jiang Q.-C., Qiu F. Development trend in composition optimization, microstructure manipulation, and strengthening methods of die steels under lightweight and integrated die casting. *Materials*. 2023;16(18):6235. <https://doi.org/10.3390/ma16186235>
2. Weinert A., Tormey D., O'Hara C., McAfee M. Condition monitoring of additively manufactured injection mould tooling: A review of demands, opportunities and potential strategies. *Sensors*. 2023;23(4):2313. <https://doi.org/10.3390/s23042313>
3. Milinović A., Stojšić J., Kladarić I., Matijević B. Evaluation of boride layers on C70W2 steel using a new approach to characterization of boride layers. *Materials*. 2022;15(11):3891. <https://doi.org/10.3390/ma15113891>
4. Полянский И.П., Вихрев Р.О., Сизов И.Г. Структура и свойства боридных покрытий на инструментальных сталях. *Ползуновский вестник*. 2023;1:171–177. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021>
5. Pashechko M., Dzedzic K., Jozwik J. Analysis of wear resistance of borided steel C45. *Materials*. 2020;13(23):5529. <https://doi.org/10.3390/ma13235529>
6. Пугачева Н.Б., Быкова Т.М. Исследование методов борирования, анализ структуры и свойств получаемых покрытий. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2020;2:38–60. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.2.038-060>
7. Mednikov A., Tkhabisimov A., Kalakuckaya O., Zilova O., Kachalin G. Studies of boriding using possibility to increase the corrosion resistance of cast steel 20GL. *Coatings*. 2022;12(11):1789. <https://doi.org/10.3390/coatings12111789>
8. Bartkowska A., Bartkowski D., Przystacki D., Hajkowski J., Miklaszewski A. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. *Coatings*. 2021;11(5):608. <https://doi.org/10.3390/coatings11050608>

9. Günen A., Ergin Ö. A comparative study on characterization and high-temperature wear behaviors of thermochemical coatings applied to cobalt-based haynes 25 superalloys. *Coatings*. 2023; 13(7):1272. <https://doi.org/10.3390/coatings13071272>
10. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Кондратова О.А., Кириллова А.В. Структурно-фазовые состояния и свойства высокотемпературного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;2 (40):47–56.
11. Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Иванов Ю.Ф., Крысина О.В., Прокопенко Н.А. Электронно-пучковая обработка поверхности металлических материалов, изготовленных аддитивным способом. *Известия вузов. Физика*. 2022;65(11(780)):168–175. <https://doi.org/10.17223/00213411/65/11/168>
12. Valkov S., Dechev D., Ivanov N., Bezduhnyi R., Ormanova M., Petrov P. Influence of beam power on young's modulus and friction coefficient of Ti-Ta alloys formed by electron-beam surface alloying. *Metals*. 2021;11(8):1246. <https://doi.org/10.3390/met11081246>
13. Невский С.А., Сарычев В.Д., Громов В.Е. Комбинированные гидродинамические неустойчивости и их роль в образовании микро- и наноструктур материалов при плазменных воздействиях. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;1(43):10–16. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-10-16)
14. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of ALSi 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20):4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
15. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification. *Journal of alloys and Compounds*. 2021;881:160651. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2021.160651>
16. Улаханов Н., Мишигдоржийн У., Тихонов А., Шустов А., Пятых А. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием В-АI-слоев химико-термической обработкой. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021;17(12(204)):557–564. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564>
17. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects. *Russ Phys J*. 2021;63:1651–1660. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02219-3>
18. Vorobyov M., Koval T., Shin V., Moskvina P., Tran M.K.A., Koval N., Ashurova K., Doroshkevich S., Torba M. Controlling the Specimen surface temperature during irradiation with a submillisecond electron beam produced by a plasma-cathode electron source. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021;49(9):2550–2553. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3089001>
19. Vorobyov M.S., Moskvina P.V., Shin V.I., Koval T.V., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Y., Koval N.N., Torba M.S., Ashurova K.T. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode. *Technical Physics*. 2022;67(6):747–752. <http://dx.doi.org/10.21883/TP.2022.06.54422.14-22>
20. Рубанникова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Романов Д.А., Кормышев В.Е. Механические и трибологические свойства борированного слоя, наплавленного на низкоуглеродистую сталь. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019;16(3):387–393.

## REFERENCES

1. Bao Z.-J., Yang H.-Y., Dong B.-X., Chang F., Li C.-D., Jiang Y., Chen L.-Y., Shu S.-L., Jiang Q.-C., Qiu F. Development trend in composition optimization, microstructure manipulation, and strengthening methods of die steels under light-weight and integrated die casting. *Materials*. 2023;16(18):6235. <https://doi.org/10.3390/ma16186235>
2. Weinert A., Tormey D., O'Hara C., McAfee M. Condition monitoring of additively manufactured injection mould tooling: A review of demands, opportunities and potential strategies. *Sensors*. 2023;23(4):2313. <https://doi.org/10.3390/s23042313>
3. Milinović A., Stojić J., Kladarić I., Matijević B. Evaluation of boride layers on C70W2 steel using a new approach to characterization of boride layers. *Materials*. 2022;15(11):3891. <https://doi.org/10.3390/ma15113891>
4. Polyansky I.P., Vikhrev R.O., Sizov I.G. Structure and properties of boride coatings on tool steels. *Polzunovsky bulletin*. 2023;1:171–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021>
5. Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Analysis of wear resistance of borided steel C45. *Materials*. 2020;13(23):5529. <https://doi.org/10.3390/ma13235529>
6. Pugacheva N.B., Bykova T.M. Investigation of boration methods, analysis of the structure and properties of the coatings obtained. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2020,2:38–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.2.038-060>
7. Mednikov A., Tkhabisimov A., Kalakuckaya O., Zilova O., Kachalin G. Studies of boriding using

- possibility to increase the corrosion resistance of cast steel 20GL. *Coatings*. 2022;12(11):1789. <https://doi.org/10.3390/coatings12111789>
8. Bartkowska A., Bartkowski D., Przystacki D., Hajkowski J., Miklaszewski A. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. *Coatings*. 2021;11(5):608. <https://doi.org/10.3390/coatings11050608>
  9. Günen A., Ergin Ö. A comparative study on characterization and high-temperature wear behaviors of thermochemical coatings applied to cobalt-based haynes 25 superalloys. *Coatings*. 2023; 13(7):1272. <https://doi.org/10.3390/coatings13071272>
  10. Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Grmov V.E., Shlyarova Yu.A., Kondratova O.A., Kirillova A.V. Structural-phase states and properties of high-entropy CrMnFeCoNi alloy after electron-beam processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;2(40):47–56. (In Russ.).
  11. Tarasov A.D., Petryakova E.A., Ivanov Yu.F., Krysina O.V., Prokopenko N.A. Electron beam surface treatment of metal materials manufactured by additive method. *News of universities. Physics*. 2022;65(11(780)):168–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/00213411/65/11/168>
  12. Valkov S., Dechev D., Ivanov N., Bezdushnyi R., Ormanova M., Petrov P. Influence of beam power on young's modulus and friction coefficient of Ti-Ta alloys formed by electron-beam surface alloying. *Metals*. 2021;11(8):1246. <https://doi.org/10.3390/met11081246>
  13. Nevsky S.A., Sarychev V.D., Gromov V.E. Combined hydrodynamic instabilities and their role in the formation of micro- and nanostructures of materials under plasma influences. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;1(43):10–16. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-10-16)
  14. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of ALSI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20):4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
  15. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification. *Journal of alloys and Compounds*. 2021;881:160651. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2021.160651>
  16. Ulukhanov N., Mishigdorjiin U., Tikhonov A., Shustov A., Pyatykh A. Modification of the surface layer of stamped steels by creating B-Al layers by chemical and thermal treatment. *Reinforcing technologies and coatings*. 2021;17(12(204)):557–564. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564>
  17. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects. *Russ Phys J*. 2021;63:1651–1660. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02219-3>
  18. Vorobyov M., Koval T., Shin V., Moskvina P., Tran M.K.A., Koval N., Ashurova K., Doroshkevich S., Torba M. Controlling the Specimen surface temperature during irradiation with a submillisecond electron beam produced by a plasma-cathode electron source. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021;49(9):2550–2553. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3089001>
  19. Vorobyov M.S., Moskvina P.V., Shin V.I., Koval T.V., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Y., Koval N.N., Torba M.S., Ashurova K.T. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode. *Technical Physics*. 2022;67(6):747–752. <http://dx.doi.org/10.21883/TP.2022.06.54422.14-22>
  20. Bannikova Yu.A., Ivanov Yu.F., Romanov D.A., Kormyshev V.E. Mechanical and tribological properties of the boron layer deposited on low-carbon steel. *Fundamental problems of modern materials science*. 2019;16(3):387–393. (In Russ.).
- Сведения об авторах**  
**Николай Сергеевич Улаханов**, научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН  
**E-mail:** [nulahanov@mail.ru](mailto:nulahanov@mail.ru)  
**ORCID** 0000-0002-0635-4577  
**SPIN-код:** 8147-1096
- Ундрах Лхагвасуренович Мишигдоржийн**, к.т.н., заведующий лабораторией физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН  
**E-mail:** [undrakh@ipms.bscnet.ru](mailto:undrakh@ipms.bscnet.ru)  
**ORCID** 0000-0002-7863-9045  
**SPIN-код:** 2781-4995
- Александр Петрович Семенов**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН  
**E-mail:** [alexandersemenov2018@mail.ru](mailto:alexandersemenov2018@mail.ru)  
**ORCID** 0000-0002-1817-3044  
**SPIN-код:** 8786-3514

**Александр Станиславович Милонов**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН  
*E-mail:* terwer81@mail.ru  
*ORCID* 0000-0001-7397-3581  
*SPIN-код:* 6757-0787

**Максим Сергеевич Воробьев**, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
*E-mail:* vorobyovms@yandex.ru  
*ORCID* 0000-0001-5136-5905  
*SPIN-код:* 9881-0267

**Павел Владимирович Москвин**, научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
*E-mail:* pavelmoskvin@mail.ru  
*ORCID* 0000-0002-5240-9970  
*SPIN-код:* 3572-1028

**Владислав Игоревич Шин**, научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН  
*E-mail:* shin.vi@yandex.ru  
*ORCID* 0000-0003-4888-4338  
*SPIN-код:* 3913-6074

**Information about the authors:**

*Nikolai S. Ulakhanov, Researcher, Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences*  
*Email:* nulahanov@mail.ru  
*ORCID:* 0000-0002-0635-4577  
*SPIN-код:* 8147-1096

**Undrakh L. Mishigdorzhiiin**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Head of the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
*E-mail:* undrakh@ipms.bscnet.ru  
*ORCID:* 0000-0002-7863-9045  
*SPIN-код:* 2781-4995

**Alexander P. Semenov**, *Dr. Sci. (Eng.)*, Chief Researcher of the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
*E-mail:* alexandersemenov2018@mail.ru  
*ORCID:* 0000-0002-1817-3044  
*SPIN-код:* 8786-3514

**Aleksandr S. Milonov**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Senior Researcher at the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
*E-mail:* terwer81@mail.ru  
*ORCID* 0000-0001-7397-3581  
*SPIN-код:* 6757-0787

**Maksim S. Vorob'ev**, *Dr. Sci. (Eng.)*, Leading Researcher at the laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
*E-mail:* vorobyovms@yandex.ru  
*ORCID* 0000-0001-5136-5905  
*SPIN-код:* 9881-0267

**Pavel V. Moskvin**, *Researcher at the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences*  
*E-mail:* pavelmoskvin@mail.ru  
*ORCID* 0000-0002-5240-9970  
*SPIN-код:* 3572-1028

**Vladislav I. Shin**, *Researcher of Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences*  
*E-mail:* shin.vi@yandex.ru  
*ORCID* 0000-0003-4888-4338  
*SPIN-код:* 3913-6074

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 17.11.2023

После доработки 13.02.2024

Принята к публикации 19.02.2024

Received 17.11.2023

Revised 13.02.2024

Accepted 19.02.2024