



## РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 620.183; 620.187

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.022



### БОРИРОВАНИЕ СТАЛИ 3Х2В8Ф ДИФФУЗИОННЫМ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Ундрах Лхагвасуренович Мишигдоржийн <sup>1</sup>,  
Павел Анатольевич Гуляшинов <sup>2</sup>, Степан Алексеевич Лысых <sup>3</sup>,  
Николай Сергеевич Улаханов <sup>4</sup>, Павел Владимирович Москвин <sup>5</sup>,  
Максим Сергеевич Воробьев <sup>6</sup>

<sup>1, 3, 4</sup> Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup> Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук (БИП СО РАН), Улан-Удэ, Россия

<sup>5, 6</sup> Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), Томск, Россия

<sup>1</sup> undrakh@ipms.bscnet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>

<sup>2</sup> gulpasha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6776-9314>

<sup>3</sup> lysyh.stepa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>

<sup>4</sup> nulahanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0635-4577>

<sup>5</sup> pavelmoskvin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5240-9970>

<sup>6</sup> vorobyovms@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5136-5905>

**Аннотация.** Требуемые теплофизические и механические свойства металлических изделий могут быть обеспечены за счет формирования на их поверхности защитных борсодержащих покрытий и диффузионных слоев. В настоящей работе проведено сравнительное исследование двух процессов нанесения боридного слоя на поверхность легированной стали 3Х2В8Ф – диффузионного борирования (ДБ) и электронно-пучкового легирования (ЭПЛ). В обоих случаях в качестве источника бора применяли пасты на основе карбида бора. Диффузионное борирование проводили в течение 2 часов при температуре 1050 °С в насыщающих пастах. Электронно-пучковое легирование проводили на базе модернизированного источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Ток разряда изменяли в течение импульса длительностью 1 мс, в пределах 30–110 А таким образом, чтобы температура на поверхности образца через 200 мкс после начала воздействия удерживалась ~2000 °С. Поверхность образцов подвергали двенадцати импульсам воздействия, интервал времени между которыми составлял 3 секунды. В результате ДБ на поверхности стали 3Х2В8Ф получены боридные слои толщиной до 60 мкм. После ЭПЛ толщина слоя в два раза выше и достигает 130 мкм. Установлено, что после ДБ и ЭПЛ на поверхности стали формируются бориды железа Fe<sub>2</sub>B и FeB. Максимальная микротвердость боридных слоев составила 1120 HV и 1015 HV на после ДБ и ЭПЛ соответственно. Легирование электронным пучком приводит к формированию более протяженного по глубине боридного слоя за короткий промежуток времени. При этом фазовый состав идентичен слою после ДБ, а микротвердость слоев после обоих процессов сопоставима.

**Ключевые слова:** электронно-пучковое легирование, диффузионное легирование, борирование в пастах, бориды, легированная сталь, микроструктура, микротвердость, пластичность.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовом обеспечении гранта Российского Научного Фонда (проект 19-79-10163-П).

**Для цитирования:** Борирование стали 3Х2В8Ф диффузионным и электронно-пучковым легированием / У. Л. Мишигдоржийн [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 149–155. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.022, EDN: <https://elibrary.ru/EKKYZZ>.

## BORIDING OF 3Kh2V8F STEEL BY DIFFUSION AND ELECTRON BEAM ALLOYING

Undrakh L. Mishigdorzhiiyn<sup>1</sup>, Pavel A. Gulyashinov<sup>2</sup>, Stepan A. Lysykh<sup>3</sup>,  
Nikolay S. Ulakhanov<sup>4</sup>, Pavel V. Moskvina<sup>5</sup>, Maxim S. Vorob'yev<sup>6</sup>

<sup>1, 3, 4</sup> Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

<sup>2</sup> Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

<sup>5, 6</sup> Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia

<sup>1</sup> undrakh@ipms.bscnet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>

<sup>2</sup> gulpasha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6776-9314>

<sup>3</sup> lysykh.stepa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>

<sup>4</sup> nulakhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0635-4577>

<sup>5</sup> pavelmoskvina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5240-9970>

<sup>6</sup> vorob'yevms@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5136-5905>

**Abstract.** The required physical, thermal and mechanical properties of metal products can be ensured by forming protective boron-containing coatings and diffusion layers on their surface. In current study, a comparative analysis of two processes for applying a boride layer to the surface of 3Kh2V8F alloy steel - diffusion boriding (DB) in saturating pastes and electron beam alloying (EBA) - was carried out. In both cases, pastes based on boron carbide were used as a source of boron. Diffusion boriding was carried out for 2 hours at a temperature of 1050 °C in saturating pastes. Electron beam alloying was carried out on the basis of a modernized electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge. The discharge current was varied during a 1 ms pulse, within the range of 40–90 A, so that the temperature on the surface of the sample was maintained at ~2000 °C after the start of 200 μs exposure. The surface of the samples was subjected to three pulses with the interval of 3 seconds. As a result of DB, the boride layers up to 60 μm thick were obtained on the surface of 3Kh2V8F steel. After EBA, the layer thickness was twice as high and reached 130 μm. It has been established that after DB and EBA, iron borides Fe<sub>2</sub>B and FeB were formed on the steel surface. The maximum microhardness of the boride layers was 1120 HV and 1015 HV after DB and EBA, respectively. Surface alloying with the pulsed electron beam leads to the formation of the thick boride layer in a short period of time. At the same time, the phase composition was identical to the layer after DB, and the microhardness of the layers after both processes was comparable.

**Keywords:** electron beam alloying, diffusion alloying, boriding in pastes, borides, alloy steel, microstructure, microhardness, plasticity.

**Acknowledgements:** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 19-79-10163-P).

**For citation:** Mishigdorzhiiyn, U.L., Gulyashinov, P.A., Lysykh, S.A., Ulakhanov, N.S., Moskvina, P.V. & Vorob'yev, M.S. (2024). Boriding of 3Kh2V8F steel by diffusion and electron beam alloying. *Polzunovskiy vestnik*. (4), 149-155. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.022, EDN: <https://elibrary.ru/EKKYZZ>.

### ВВЕДЕНИЕ

Приоритетным направлением современного материаловедения является повышение эксплуатационной стойкости рабочих поверхностей деталей машин. Известно, что эффективным методом формирования необходимых свойств является химико-термическая обработка (ХТО), заключающаяся в диффузионном легировании (ДЛ) поверхности металлов и сплавов различными химическими элементами [1]. В настоящее время известно несколько методов ХТО, различаемые по типу насыщающей среды: газовые, жидкостные и твердофазные (в порошковых средах и пастах) [2, 3]. Перечисленные способы ХТО требуют длительной выдержки при высокой температуре из-за малых коэффициентов диффузии легирующих элементов, что отрицательно влияет на структуру и свойства основного металла. Во многом данный недоста-

ток решается за счет совмещения ХТО с термической обработкой. Так, закалка и отпуск после жидкостного борирования позволяют повысить поверхностную твердость до 2000 HV и сохранить прочность всего изделия [3].

Диффузионные боридные слои, как правило, имеют игольчатую или зубчатую структуру, вызванную преимущественным ростом кристаллов боридов в направлении [4]. Данное строение кристаллов обеспечивает высокую поверхностную твердость и износостойкость [5, 6]. Однако с повышением упомянутых свойств сопротивление ударным нагрузкам снижается. Существует несколько способов снижения хрупкости боридных слоев, одним из которых является электронно-лучевая обработка предварительно полученных диффузионных боридных слоев с целью их структурно-фазовой модификации [7].

## БОРИРОВАНИЕ СТАЛИ 3Х2В8Ф ДИФфуЗИОННЫМ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Известно, что методы обработки концентрированными потоками энергии (КПЭ), такие как лазерная и электронно-лучевая обработка (ЭЛО), способны за короткий промежуток времени нагреть участок поверхности материала [8–10] и не требуют длительного температурного воздействия на материал основы. В настоящее время электронно-лучевые технологии находят все более широкое применение в создании борсодержащих покрытий. В отличие от установок с непрерывным электронно-лучевым нагревом использование источников электронов с плазменным катодом обеспечивает высокую плотность энергии и возможность регулировки мощности пучка в течение субмиллисекундной длительности импульса тока пучка [11–13]. Это позволяет контролировать температуру поверхности и сократить время обработки при электронно-пучковом легировании.

Цель настоящей работы – получить защитные боридные диффузионные слои и покрытия на поверхности штамповой стали 3Х2В8Ф двумя разными способами. В ходе работы планируется исследовать микроструктуру и строение слоёв и покрытий, полученных методом диффузионного насыщения и электронно-пучковым легированием (ЭПЛ).

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве насыщающих смесей использовались порошкообразные материалы: карбид бора В<sub>4</sub>С марки F-220, натрий фтористый NaFчда (ГОСТ 4463-76). Для процесса борирования использовалась смесь 96 % В<sub>4</sub>С + 4 % NaF.

Процессы ХТО в порошках проводились в лабораторной печи ПМ-16П-ТД при температуре 1050 °С. ХТО подверглись образцы из штамповой стали 3Х2В8Ф размером 20×20×10 мм. Продолжительность процесса обработки составляла 2 ч. Сталь 3Х2В8Ф применяется для изготовления штамповой оснастки для процессов горячего деформирования легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов (состав, в % (весовых): Fe ≈ 87, С 0,3–0,4, Si 0,15–0,4, Mn 0,15–0,4, Cr 2,2–2,7, W 7,5–8,5, V 0,2–0,5, Мо до 0,5).

Порошковая смесь засыпалась в тигель вместе с исследуемыми образцами, далее тигель упаковывался и герметизировался сверху плавким затвором. Охлаждение тиглей проводилось на открытом воздухе при комнатной температуре. Далее тигли вскрывались, образцы зачищались от остатков насыщающей смеси.

ЭПЛ проводили в установке «СОЛО» (рис. 1, а) с источником электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления [12, 13] в Институте сильноточной электроники СО РАН. На рис. 1, б показана структурная схема обработки образцов в импульсной электронно-пучковой установке [14].

На поверхность образца наносилась насыщающая паста толщиной 0,2 мм из карби-

да бора, предварительно замешанном на органическом связующем (БФ-4).

ЭПЛ производилась в среде аргона при давлении в вакуумной камере 35 МПа в магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 18 кэВ, диаметр пучка электронов 3 см.

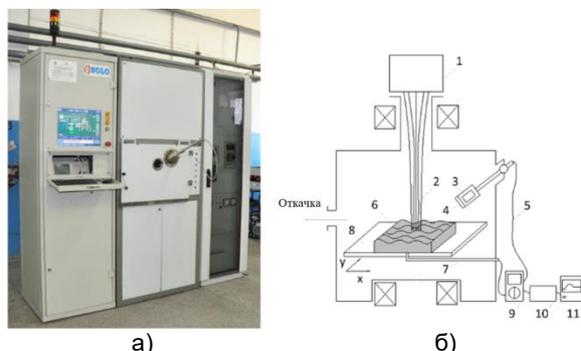


Рисунок 1 – Внешний вид установки «СОЛО» (а) и схема обработки образцов (б): 1 – источник электронов; 2 – электронный пучок; 3 – объектив; 4 – кварцевое стекло; 5 – оптоволоконный кабель; 6 – образец; 7 – термопара; 8 – стол-манипулятор; 9 – мультиметр; 10 – высокоскоростной инфракрасный пирометр; 11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

Figure 1 – Appearance of the SOLO installation (a) and sample processing scheme (b): 1 - electron source; 2 - electron beam; 3 - lens; 4 - quartz glass; 5 - fiber-optic cable; 6 - sample; 7 - thermocouple; 8 - manipulator table; 9 - multimeter; 10 - high-speed infrared pyrometer; 11 - oscilloscope

Ток разряда изменяли в течение импульса длительностью 1 мс, в пределах 30–110 А таким образом, чтобы температура на поверхности образца через 200 мкс после начала воздействия удерживалась ~2000 °С. Поверхность образцов подвергали двенадцати импульсам воздействия, интервал времени между которыми составлял 3 секунды. Типовая осциллограмма электронно-пучкового воздействия представлена на рисунке 2.

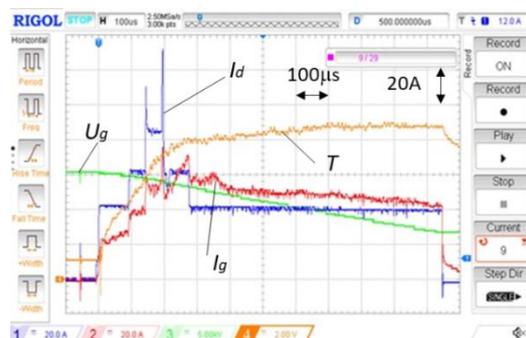


Рисунок 2 – Осциллограмма электронно-пучкового легирования:  $I_d$ , 20 А/деление,  $I_g$ , 20 А/деление,  $T[°C] = 333+410 \times N_{кл.}$ , масштаб  $U_g - 5$  кВ/деление, развертка – 100 мкс/деление

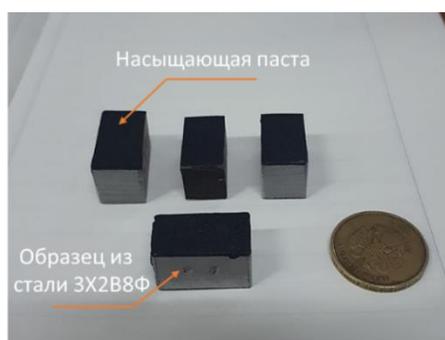
Figure 2 – Electron beam doping waveform:  $I_d$ , 20 A/division,  $I_g$ , 20 A/division,  $T[°C] = 333+410 \times N_{кл.}$ , scale  $U_g - 5$  kV/division, scan - 100 microseconds/division

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «МЕТАМ РВ-34» с цифровой камерой «Altami Studio». Состав и структуру диффузионного слоя определяли на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL (Япония) с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments (Великобритания) в Центре коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВО Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. Определение микротвердости насыщенных слоев осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3М с нагрузкой 50 гр. Снимки микроструктур были сделаны с помощью металлографического микроскопа «МЕТАМ РВ-34» с цифровой камерой «Altami Studio» (Россия).

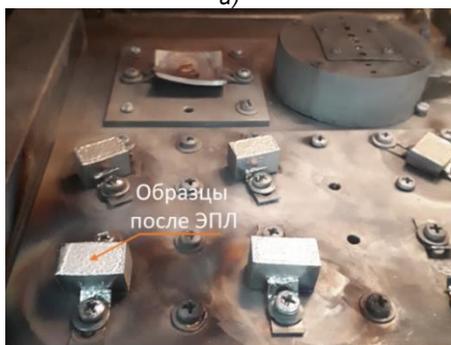
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс борирования проводился на образцах стали 3Х2В8Ф при температуре 1050 °С с выдержкой 2 ч.

На рис. 3 представлены фотографии образцов исследуемой стали после нанесения насыщающей пасты перед обработкой электронным пучком и после процесса ЭПЛ. Образцы после ЭПЛ имеют ровную глянцевую поверхность.



а)



б)

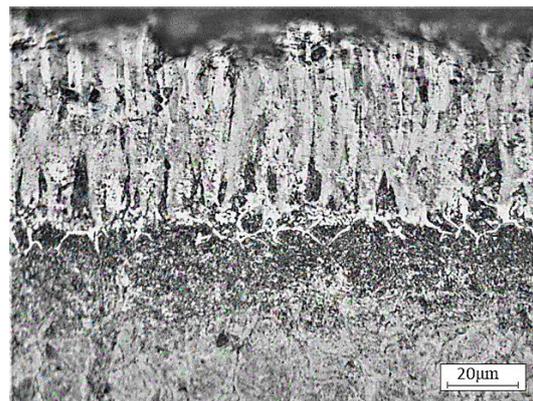
Рисунок 3 – Внешний вид образцов: а) после нанесения насыщающей пасты; б) после ЭПЛ

Figure 3 – Appearance of the samples: a) after applying the saturating paste, b) after EPL

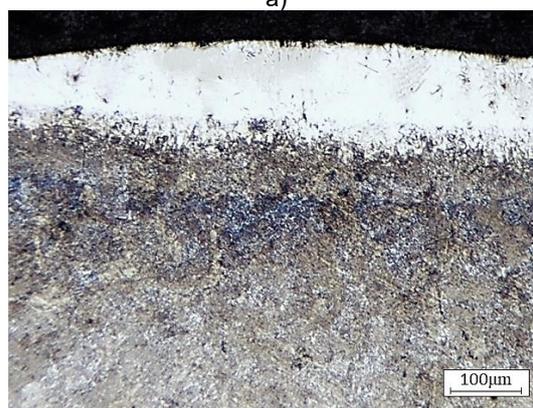
На рисунке 4, а представлена микрофотография структуры образца после ХТО. На данном рисунке отчетливо видна характерная для борированных слоев игольчатая структура и переходная зона. У боридных игл наблюдаются примыкающие от-

ки. Наиболее вероятно, это карборидная фаза из-за насыщения оттесненным в процессе диффузии бора углеродом. Толщина полученного диффузионного слоя после ХТО составляет ~60 мкм.

На рисунке 4, б представлена микрофотография структуры после ЭПЛ. Получен сплошной светлый слой толщиной до 130 мкм. Под слоем наблюдается переходная зона. Микроструктура полученного покрытия имеет мелкозернистую структуру со сферическими кристаллами размером до 5 мкм.



а)



б)

Рисунок 4 – Микроструктуры боридных слоев: а) после ХТО; б) после ЭПЛ

Figure 4 – Microstructures of boride layers: а) after CTO, б) after EPL

Максимальная микротвердость боридных слоев составила 1120HV и 1015HV на после ХТО и ЭПЛ соответственно (рис. 5). Причем на ХТО данные значения достигаются на глубине 20–30 мкм от поверхности, а после ЭПЛ максимальная микротвердость – на глубине 50–60 мкм. После процесса борирования на сталях обычно наблюдается краевой эффект с высокой хрупкостью поверхностного слоя из-за высокой концентрации фазы FeV, поэтому занижаются реальные значения микротвердости. Профиль микротвердости после ХТО изменяется скачкообразно (рис. 5, а), на границе с основным металлом значения резко снижаются до микротвердости основного металла 320–340 HV. После ЭПЛ профиль микротвердости характеризуется

## БОРИРОВАНИЕ СТАЛИ 3Х2В8Ф ДИФфуЗИОННЫМ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

более равномерным распределением по глубине слоя (рис. 5, б). Такое распределение является результатом наличия развитой переходной зоны и способствует плавному распределению остаточных напряжений и повышенной адгезии, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках защитных слоев [15].

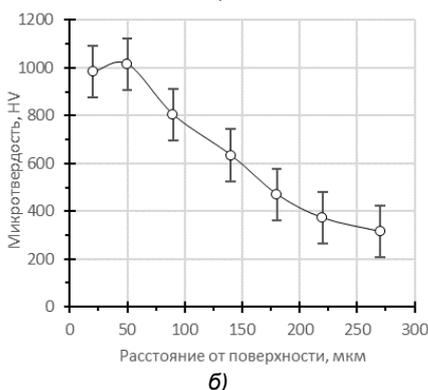
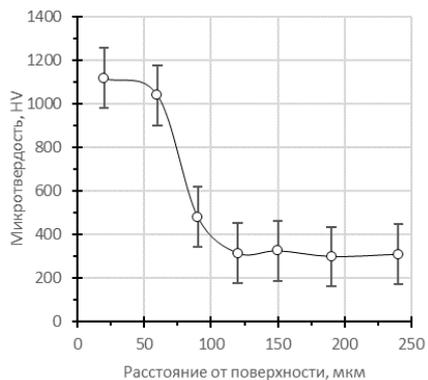


Рисунок 5 – Распределение микротвердости по глубине слоя после: а) после ХТО; б) после ЭПЛ

Figure 5 – Distribution of microhardness over the depth of the layer after: a) after CTO, b) after EPL

Рентгеноспектральный микроанализ показал (рис 6), что максимальное содержание бора

Таблица 1 – Элементный состав стали 3Х2В8Ф после ХТО при 1050 °С, % вес.

Table 1 – Elemental composition of 3X2V8F steel after CTO at 1050 °C, % weight

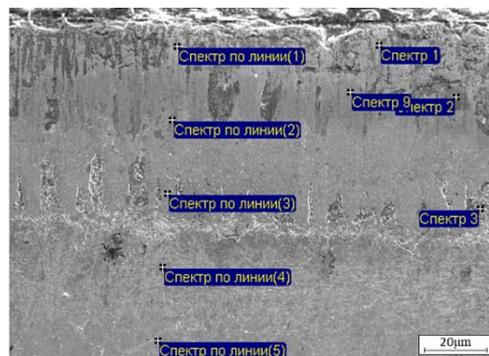
Спектр	B	C	V	Cr	Fe	W
Спектр 1	10.45	4.52	–	4.05	65.41	13.04
Спектр 2	10.84	5.08	–	11.33	68.93	3.82
Спектр 3	3.14	3.98	–	6.63	80.68	2.80
Спектр по линии (1)	11.84	3.77	0.59	10.69	71.54	2.16
Спектр по линии (2)	1.74	4.81	0.55	11.28	71.76	9.86
Спектр по линии (3)	3.26	5.47	0.41	10.42	74.21	6.63
Спектр по линии (4)	–	7.30	0.39	13.55	77.37	1.78
Спектр по линии (5)	–	7.45	0.51	10.45	76.69	5.41
Спектр 9	–	3.74	–	12.84	77.61	5.82

Таблица 2 – Элементный состав стали 3Х2В8Ф после ЭПЛ, % вес.

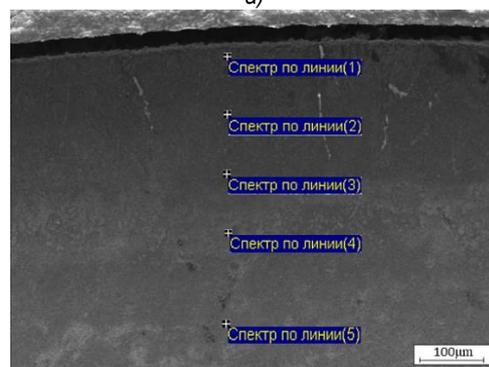
Table 2 – Elemental composition of 3X2V8F steel after EPL, % weight

Спектр	B	C	V	Cr	Fe	W
Спектр по линии (1)	5.1	4.32	–	8.21	78.59	1.54
Спектр по линии (2)	2.1	3.91	–	9.6	72.7	13.4
Спектр по линии (3)	2.1	4.01	–	7.9	82.00	3.03
Спектр по линии (4)	–	7.01	–	11.1	79	2.89
Спектр по линии (5)	–	6.4	–	10.77	74.31	8.52

на стали 3Х2В8Ф после ХТО составляет 11,84 % в спектре по линии 1 на глубине 30 мкм от поверхности, а на образце после ЭПЛ – 5,1 % в спектре по линии 1. Более высокая концентрация бора на образце после ХТО может свидетельствовать о высоком содержании боридов FeB в диффузионном слое.



а)



б)

Рисунок 6 – Изображение участков анализа во вторичных электронах на стали 3Х2В8Ф: а) после ХТО; б) после ЭПЛ

Figure 6 – Image of the analysis sites in secondary electrons on 3X2V8F steel: a) after CTO, b) after EPL

Образцы после ХТО и ЭПЛ были направлены на РФА для определения фазового состава поверхностного диффузионного слоя, а также по глубине полученного слоя. На рис. 7 представлена рентгенограмма: после борирования на поверхности образуются фазы FeB и Fe<sub>2</sub>B. На глубине 20 мкм от поверхности появляется фаза α-Fe. На глубине 50 мкм идентифицируются фазы FeB, Fe<sub>2</sub>B и α-Fe.

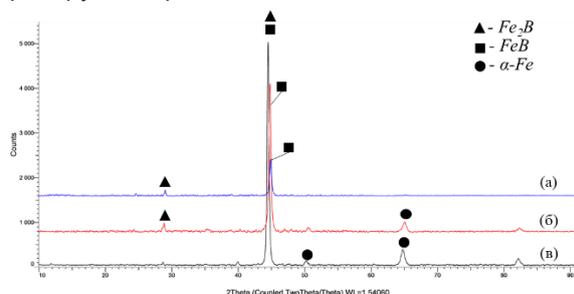


Рисунок 7 – Рентгенограмма образцов после ХТО: а) на поверхности; б) на глубине 20 мкм; в) на глубине 50 мкм

Figure 7 – X-ray of samples after CTO: a) on the surface, b) at a depth of 20 microns, c) at a depth of 50 microns

На рисунке 8 представлена рентгенограмма после ЭПЛ, на поверхности образуются фазы FeB и Fe<sub>2</sub>B. На глубине 60 мкм от поверхности появляется фаза α-Fe. На глубине 120 мкм идентифицируются фазы FeB, α-Fe.

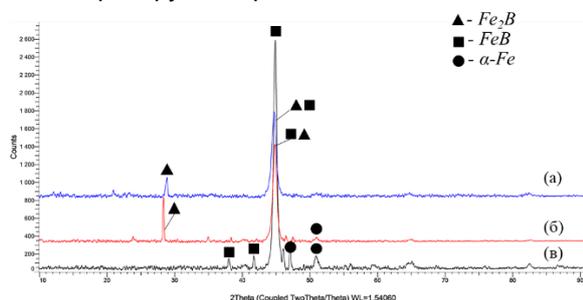


Рисунок 8 – Рентгенограмма образцов после ЭПЛ: а) на поверхности; б) на глубине 60 мкм; в) на глубине 120 мкм

Figure 8 – X-ray of samples after EPL: a) on the surface; b) at a depth of 60 microns; c) at a depth of 120 microns

## ВЫВОДЫ

Легирование электронным пучком приводит к формированию более протяженного по глубине боридного слоя за короткий промежуток времени. В результате легирования на поверхности стали 3Х2В8Ф получены боридные слои толщиной до 60 мкм и 130 мкм после ДБ и ЭПЛ соответственно, состоящие из боридов железа. Микротвердость слоев после обоих процессов сопоставима. Таким образом, ЭПЛ может быть использовано для формирования боридных слоев.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошнин, Л.Г. Теория и технология химико-термической обработки : учеб. пособие / Л.Г. Ворошнин, О.Л. Менделеева, В.А. Сметкин. М. : Новое знание, 2010. 304 с.

2. Atul S.C., Adalarasan R., Santhanakumar M. Study on slurry paste boronizing of 410 martensitic stainless steel using taguchi based desirability analysis (TDA) // International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering. 2015. Vol. 5. P. 64–77. DOI: 10.4018/IJMMME.2015070104.

3. Nakajo H, Nishimoto A. Boronizing of CoCr FeMnNi High-Entropy Alloys Using Spark Plasma Sintering // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2022. Vol. 6. 29. DOI: 10.3390/jmmp6020029.

4. Цих С.Г., Красуля А.А. Инновации в процессах борирования. Арматуростроение. 2021. № 5 (134). С. 54–59.

5. Raden Dadan Ramdan, Tomohiro Takaki, Kisaragi Yashiro, Yoshihiro Tomita. The Effects of Structure Orientation on the Growth of Fe<sub>2</sub>B Boride by Multi-Phase-Field Simulation, MATERIALS TRANSACTIONS, 2010, Volume 51, Issue 1, Pages 62–67, 2009. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2009227>.

6. Mertgenç E., Kayali Y. 2023. Diffusion kinetics and boronizing of high entropy alloy produced by TIG melting reverse suction method. Canadian Metallurgical Quarterly 62, 362–371. DOI: 10.1080/00084433.2022.2082203.

7. Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P. The structure and properties of boride layers obtained as a result of electron-beam chemical-thermal treatment. Metal Science and Heat Treatment, 2001, vol. 11, pp. 45–46.

8. Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом / В.И. Шин, П.В. Москвин, М.С. Воробьев, В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2. С. 69–75. DOI: 10.31857/S0032816221020191.

9. Разработка физических основ комплексного электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности материалов и изделий / Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, Е.А. Петрикова, О.В. Крысина, В.В. Шугуров, Ю.Х. Ахмадеев, И.В. Лопатин, А.Д. Тересов, О.С. Толкачев. Гл. 1. С. 5–35. // Научные технологии в проектах РФ. Сибирь / под ред. С.Г. Псахье, Ю.П. Шаркеева. Томск : Изд-во НТЛ. 2017. 428 с. ISBN 978-5-89503-607-5.

10. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Ковалья, Ю.Ф. Иванова. Томск : Изд-во НТЛ, 2016. 298 с. ISBN 978-5-89503-577-1.

11. Devyatkov V.N. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams / V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin [et al.] // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21, No. 2. P. 243–248. DOI: 10.1017/S026303460321212X.

12. Григорьев С.В. Электронно-пучковая установка "СОЛО-М" для модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов // С.В. Григорьев, В.Н. Девятков, А.В. Миков [и др.] // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 11–3. С. 58–62.

13. Devyatkov V.N. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering / V.N. Devyatkov, Y.F. Ivanov, O.V. Krygina [et al.] // Vacuum. 2017. Vol. 143. P. 464–472. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.

## БОРИРОВАНИЕ СТАЛИ 3Х2В8Ф ДИФФУЗИОННЫМ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

14. Шин В.И. Широтная и амплитудная модуляция тока пучка для управления его мощностью в течение импульса субмиллисекундной длительности / В.И. Шин, М.С. Воробьев, П.В. Москвин [и др.] // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65, № 11(780). С. 176–184. DOI: 10.17223/00213411/65/11/176.

15. Оценка структурно-фазового и напряженного состояния диффузионных боридных слоев, полученных химико-термической обработкой, на поверхности штамповой стали 3Х2В8Ф / У.Л. Мишигдоржийн, Н.С. Улаханов, А.Г. Тихонов, П.А. Гуляшинов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23, № 2. С. 147–162. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-147-162.

### Информация об авторах

У. Л. Мишигдоржийн – кандидат технических наук, зав. лаб., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФМ СО РАН).

П. А. Гуляшинов – кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук» (БИП СО РАН).

Н. С. Улаханов – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФМ СО РАН).

С. А. Лысых – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФМ СО РАН).

П. В. Москвин – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт сильноточ-

ной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭ СО РАН).

М. С. Воробьев – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭ СО РАН).

### Information about the authors

U.L. Mishigdorjin - Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IFM SB RAS).

P.A. Gulyashinov - Candidate of Technical Sciences, Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science Baikal Institute of Environmental Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Academy of Sciences (BIP SB RAS).

N.S. Ulakhanov - junior researcher, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IFM SB RAS).

S.A. Lysykh - junior researcher, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IFM SB RAS).

P.V. Moskvin - junior researcher at the Federal State Budgetary Institution of Science, Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISE SB RAS).

M.S. Vorobyov - Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISE SB RAS).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2024; одобрена после рецензирования 20 ноября 2024; принята к публикации 04 декабря 2024.

The article was received by the editorial board on 12 Apr 2024; approved after editing on 20 Nov 2024; accepted for publication on 04 Dec 2024.