



Научная статья
2.6.17. – Материаловедение (технические науки)
УДК 669.1; 66.040

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028



ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ БОРИДНЫХ ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 5ХНМ

Степан Алексеевич Лысых ¹, Ундрах Лхагвасуренович Мишигдоржийн ²,
Юрий Петрович Хараев ³, Павел Владимирович Москвин ⁴,
Максим Сергеевич Воробьев ⁵, Максим Александрович Мокеев ⁶

^{1, 2, 6} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), г. Улан-Удэ, Россия

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТУ), г. Улан-Удэ, Россия

^{4, 5} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

¹ lsysh.stepa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>

² undrakh@ipms.bscnet.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7863-9045>

³ kharaev@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6449-4175>

⁴ pavelmoskvin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5240-9970>

⁵ vorobyovms@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5136-5905>

⁶ maks_mok@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9924-7753>

Аннотация. В работе представлены результаты поверхностного упрочнения образцов из штамповой стали 5ХНМ методом комплексного насыщения бором и медью с последующей модификацией слоя электронно-пучковой обработкой (ЭПО), используя источник с плазменным катодом. Целью работы являлось повышение ряда физико-механических свойств боридных слоев, в частности пластичности. В работе проведен сравнительный анализ строения диффузионного слоя после боромеднения и последующей модификации этого слоя электронным пучком. Проведен анализ морфологии диффузионного слоя, исследована микротвердость, элементное и фазовое строение. Проведена оценка пластичности полученных диффузионных слоев до и после ЭПО.

Ключевые слова: боромеднение, сталь 5ХНМ, диффузионный слой, микроструктура, микротвердость, пластичность, электронный пучок.

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

Для цитирования: Электронно-пучковая модификация боридных диффузионных слоев на поверхности штамповой стали 5ХНМ / С. А. Лысых [и др.]. // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 217–224. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028. EDN: <https://elibrary.ru/ZAETVV>.

Original article

ELECTRON-BEAM MODIFICATION OF BORIDE DIFFUSION LAYERS ON THE SURFACE OF 5KHNM DIE STEEL

Stepan A. Lsykh ¹, Undrakh L. Mishigdorzhijn ², Yuri P. Karaev ³,
Pavel V. Moskvin ⁴, Maxim S. Vorobyov ⁵, Maxim A. Mokeev ⁶

^{1, 2, 6} Institute of Physical Materials Science Siberian branch of the Russian Academy of sciences (IPMS SB RAS), Ulan-Ude, Russian Federation

³ East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation

^{4, 5} Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russian Federation

© Лысых С. А., Мишигдоржийн У. Л., Хараев Ю. П., Москвин П. В., Воробьев М. С., Мокеев М. А., 2023

¹ lysyh.stepa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>.

² undrakh@ipms.bscnet.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7863-9045>.

³ kharaev@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6449-4175>.

⁴ pavelmoskvin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5240-9970>.

⁵ vorobyovms@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5136-5905>.

⁶ maks_mok@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9924-7753>.

Abstract. *The paper presents the results of surface hardening of 5KhNM die steel by complex saturation with boron and copper, followed by electron beam modification by source with plasma cathode. The aim of the work is to improve physical and mechanical properties of boride layers, in particular plasticity. A comparative analysis of the boride layer before and after electron beam modification is conducted in this work. The morphology of the diffusion layer, the microhardness, the elemental and phase structure are investigated. In addition, an assessment of the plasticity of boride layers before and after modification is carried out.*

Keywords: borocoppering, 5KhNM steel, diffusion layer, microstructure, microhardness, plasticity, electron beam.

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

For citation: Lysykh, S. A., Mishigdorzhijn, U. L., Karaev, Y. P., Moskvin, P. V., Vorobyov, M. S. & Mokeev, M. A. (2023). Electron-beam modification of boride diffusion layers on the surface of 5KhNM die steel. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 217-224. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028. EDN: <https://elibrary.ru/ZAETVV>.

ВВЕДЕНИЕ

Химико-термическая обработка (ХТО) остается актуальным методом повышения ряда физико-механических свойств железо-углеродистых сплавов. Формирование на поверхности образца/изделия диффузионного слоя в результате изменения химического состава приводит к повышению стойкости против воздействия внешних разрушающих сил и факторов при различных параметрах окружающей среды [1–4].

В последнее время динамичное развитие набирает возможность обработки поверхности металлов и сплавов концентрированными потоками энергии (КПЭ) [5]. Отличие такой обработки от традиционной (ХТО) состоит в кратковременном высокоэнергетическом воздействии на поверхность обрабатываемого материала, что позволяет повышать его функциональные свойства, такие как износостойкость, жаростойкость и коррозионную стойкость в несколько раз [6, 7].

В литературе в малом количестве отражается возможность применения комбинированной обработки, например, диффузионное легирование совместно с электронно-пучковой обработкой (ЭПО). В работе [7] автор рассматривает возможность применения ЭПО совместно с другими технологиями, а именно после электровзрывного легирования, электродуговой и электроконтактной наплавки, а также модификации поверхностных сло-

ев аддитивных сплавов. Авторы [7] установили, что обработка электронным пучком при оптимальных режимах позволяет существенно повысить износостойкость, микротвердость, нанотвердость, модуль Юнга, уменьшить коэффициент трения.

Целью данной работы является снижение хрупкости диффузионных боридных слоев их модификацией импульсным электронным пучком, используя уникальные возможности источников электронов с плазменным катодом, обеспечивающие достижение высокой плотности энергии с возможностью регулировки мощности пучка в течение субмиллисекундной длительности импульса тока пучка [8, 9]. В работе представлены результаты исследования микроструктуры, микротвердости, элементного и фазового состава диффузионных слоёв, полученных при упрочнении стали 5ХНМ в порошковых смесях, содержащих бор и медь, с последующей модификацией этих слоёв ЭПО с помощью источника электронов «СОЛО» с плазменным катодом [8].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом исследования выступала инструментальная штамповая сталь 5ХНМ, химический состав которой представлен в таблице 1.

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ БОРИДНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 5ХНМ

Таблица 1 – Химический состав стали 5ХНМ, масс.%.
Table 1 – Chemical composition of 5KhNM steel, wt. %.

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu	Fe
5ХНМ	0.5-0.6	0.1-0.4	0.5-0.8	1.4-1.8	до 0.03	до 0.03	0.5-0.8	0.15-0.3	до 0.3	95

Процесс насыщения бором и медью поверхности образцов проводился в порошковой смеси. Состав насыщающей смеси имел вид: 43% B_4C + 30% CuO + 25% Al +2% NaF . Образцы погружались в контейнер и засыпались насыщающей смесью. Исходя из литературных данных [10], оптимальное время выдержки составляло 4 часа. Процесс проводился в муфельной печи ЭКПС-50 при температуре 950 °С. Далее контейнер вынимался и остывал на открытом воздухе. После следовала

подготовка образцов к металлографическим исследованиям.

Для ЭПО борированного слоя использовали источник электронов "СОЛО" с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления (рис. 1) [8, 9]. В составе одноименной экспериментальной установки данный источник входит в Комплекс уникальных электрофизических установок России «УНИКУУМ» в ИСЭ СО РАН.

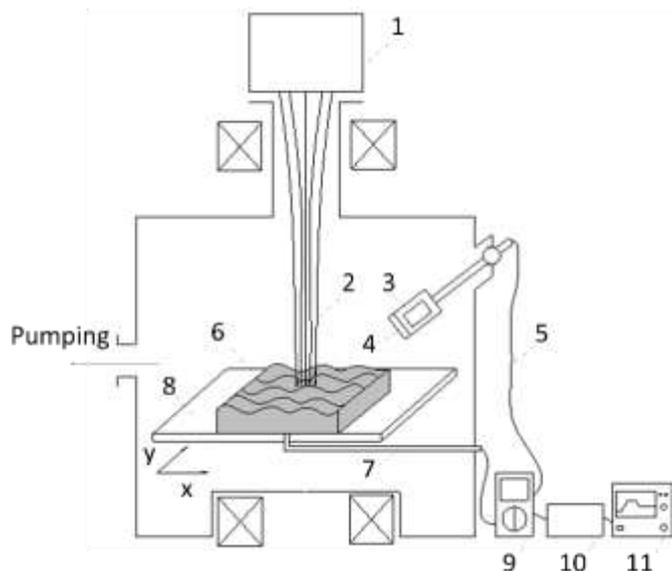


Рисунок 1 – Схема обработки в импульсной электронно-лучевой установке и внешний вид установки СОЛО (ИСЭ СО РАН): 1 – плазменный катод; 2 – электронный пучок; 3 – линза; 4 – кварцевое стекло; 5 – оптоволоконный кабель; 6 – образец; 7 – термопара; 8 – стол-манипулятор; 9 – мультиметр; 10 – высокоскоростной инфракрасный пирометр; 11 – осциллограф

Figure 1 – Processing scheme in a pulsed electron beam installation and the appearance of the SOLO installation (ISE SB RAS): 1 - plasma cathode; 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

ЭПО выполняли в среде аргона при давлении в вакуумной камере 35 мПа в ведущем магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 25 кэВ, диаметр пучка электронов составлял около 3 см. Ток пучка изменяли в течение импульса длительностью 950 мкс в пределах (20–120) А таким образом, чтобы температура на поверхности образца через 150 мкс после начала воздействия удерживалась около 1500 °С.
POLZUNOVSKIY VESTNIK № 2 2023

Исследуемую область образцов подвергали трем импульсам воздействия, интервал времени между импульсами составлял 3 секунды. Характерные осциллограммы представлены на рисунке 2.

Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 2С. Измерения микротвердости были проведены на микротвердометре ПМТ-3М, нагрузка на алмазную пирамидку составляла

50 г. Элементный анализ исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOLJCM-6510LV с элементным дисперсионным анализатором в ЦКП «Прогресс» ВСГУТУ. Для изучения структуры протравленную поверхность образцов изучали в режиме вто-

ричных электронов. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре D2 PHASER с линейным детектором LYNXEYE. Шаг измерения равнялся $0,02^\circ$, время обработки одного шага 1,2 с.

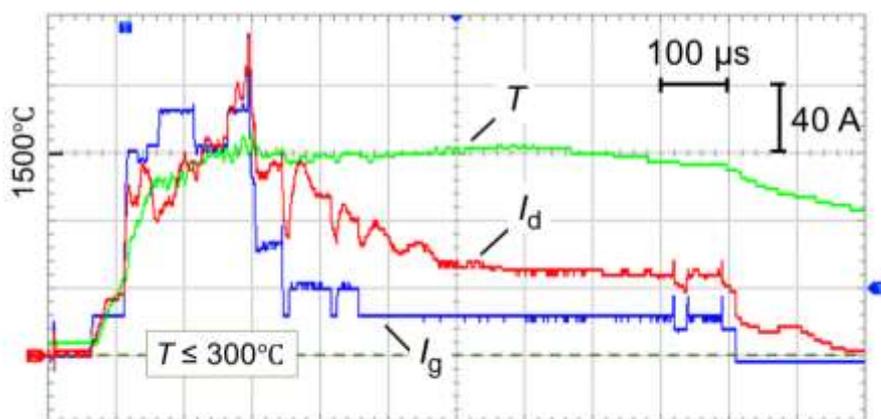


Рисунок 2 – Характерные осциллограммы тока разряда I_d плазменного катода, тока в цепи ускоряющего промежутка источника электронов I_g и выходного сигнала высокоскоростного пирометра T . $T[^\circ\text{C}] = 300 + 400n_{\text{кл}}$, где $n_{\text{кл}}$ – число клеток

Figure 2 – Characteristic oscillograms of the discharge current I_d of the plasma cathode, the current in the circuit of the accelerating gap of the electron source I_g and the output signal of the high-speed pyrometer T . $T[^\circ\text{C}] = 300 + 400p_{\text{кл}}$, where $p_{\text{кл}}$ is the number of cells

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведения упрочнения поверхности в порошковых насыщающих смесях, содержащих бор и медь, на поверх-

ности образцов из стали 5ХНМ получены диффузионные слои толщиной 205–215 мкм (рис. 3).



Рисунок 3 – Микроструктура диффузионного слоя стали 5ХНМ после комплексного поверхностного насыщения бором и медью

Figure 3 – Microstructure of the diffusion layer of 5KhNM steel after complex surface saturation with boron and copper

Диффузионный слой имеет вид игольчатого строения с плотно примыкающими друг к другу кристаллитами, срастающимися у основания. Такая структура является характерной для диффузионных слоев на основании бора. Концы игл имеют скругленную форму, их расположение наблюдается не только по норма-

ли, но и под некоторым углом. Предположительно, это связано с влиянием легирующих элементов, таких как хром и молибден, которые препятствуют возможности роста боридных игл в продольном направлении. Непосредственно у границы раздела диффузионный слой-основа металла, у боридных игл

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ БОРИДНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 5ХНМ

наблюдается примыкающие к ним выделения в виде отростков. Вероятнее всего это карборидная фаза, так как переходная зона насыщена оттесненным в процессе диффузии бора углеродом.

При проведении боромеднения с последующей электронно-пучковой обработкой на поверхности образцов получены слои, со структурой, представленной на рисунке 4.



Рисунок 4 – Микроструктура стали 5ХНМ после боромеднения с последующей электронно-пучковой обработкой

Figure 4 – Microstructure of 5KhNM steel after borocoppering and electron beam processing (EBP)

В результате воздействия электронного пучка на поверхность стали 5ХНМ, предварительно упрочненную боромеднением, был получен диффузионный слой 230–260 мкм (рис. 3). Прирост толщины диффузионного слоя составил 25–45 мкм. Как видно на рисунке 3, диффузионный слой имеет неоднородное строение. Сплошная зона от воздействия электронного пучка имеет более темный цвет после травления и четкую границу раздела от диффузионного слоя после боромеднения, который теряет игольчатое строение и компактность и становится более протяженным по глубине. Иглы приобретают вид скоагулированных перьевых включений.

При боромеднении из состава с повышенным содержанием оксида меди происходит снижение микротвердости диффузионного слоя. Как известно [1], микротвердость фазы FeV составляет 2200–2000 HV, а фазы Fe₂B – 1800–1600 HV. Максимальное значение микротвердости при проведении боромеднения на стали 5ХНМ было отмечено у основания поверхности и равнялось 1750 HV. Далее наблюдается несущественное снижение микротвердости у основания (на границе раздела), где значение микротвердости составляет 1450 HV. Переходная зона имеет микротвердость 1200–900 HV, а микротвердость основы стали составила 400–510 HV (рис. 5).

После ЭПО наблюдается уменьшение микротвердости двух фаз, составляющих слой. Фаза, образованная после ЭПО, имеет максимальное значение микротвердости,

равной 1700 HV, с последующим снижением до 1324 HV. Далее микротвердость в слое снижается с 1390 HV до 800 HV на границе раздела. В переходной зоне микротвердость достигает 950 HV с последующим плавным снижением до 360 HV в основном металле.

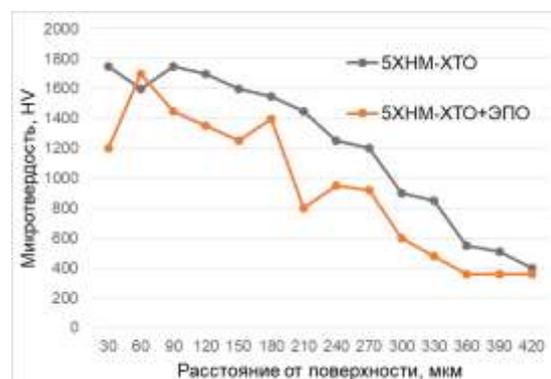


Рисунок 5 – Распределение микротвердости на стали 5ХНМ после ХТО и ХТО+ЭПО

Figure 5 – Microhardness distribution on 5KhNM steel after TCT and TCT+EBP

В результате проведения элементного анализа после двух процессов поверхностного упрочнения получены данные о распределении химических элементов, входящих в состав стали 5ХНМ. Так, после боромеднения максимальное количество бора обнаружено на поверхности, где его концентрация составила приблизительно 17 % масс (рис. 6, таблица 2), что может указывать на существование высшего борида FeB. Дальнейшее снижение бора вызвано истощением высокобо-

ристой фазы. На границе раздела «слой-основа» бора не выявлено. Стоит отметить, что наибольшее количество меди отмечается непосредственно под иглами слоя.

Элементный анализ после проведения боромеднения совместно с электронно-

пучковой обработкой показал, что концентрация бора в слое после воздействия электронного пучка снижется и достигает 10,74 % масс (рис. 7, таблица 3). Также в слое обнаружена медь в малом количестве.

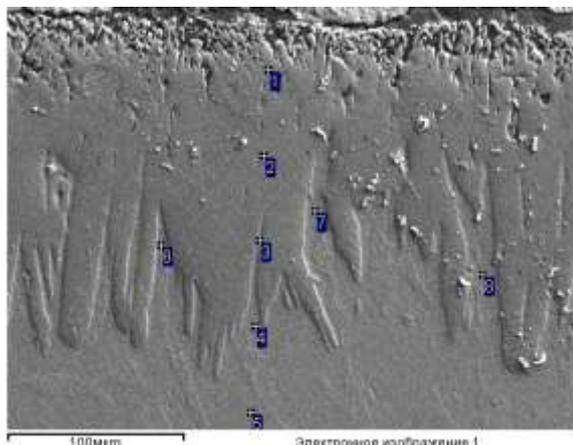


Рисунок 6 – Точки набора спектров в диффузионном слое на образце 5ХНМ после боромеднения

Figure 6 – Points of a set of spectra in the diffusion layer on a 5KhNM sample after borocoppering

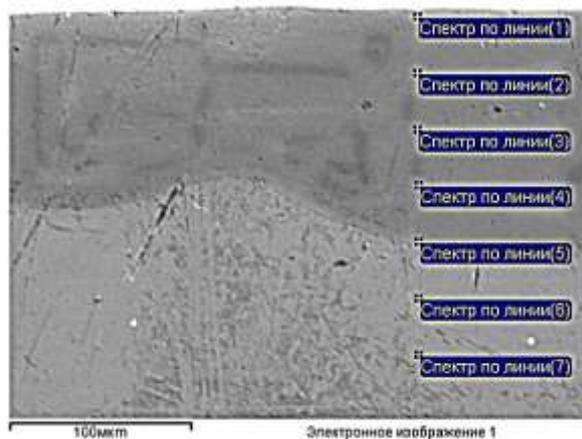


Рисунок 7 – Точки набора спектров в диффузионном слое на образце 5ХНМ после боромеднения + ЭПО

Figure 7 – Points of a set of spectra in the diffusion layer on a 5KhNM sample after borocoppering + EBP

Таблица 2 – Элементный состав диффузионного слоя на стали 5ХНМ после боромеднения (масс.%)

Table 2 – Elemental composition of the diffusion layer on 5KhNM steel after borocoppering (wt.%)

Точки спектра	C	Si	Cr	Mn	B	Mo	Ni	Cu	Fe
1	0.46	–	0.78	0.79	16.92	0.05	1.12	–	79.88
2	0.35	–	0.95	0.61	14.38	0.09	1.09	–	82.53
3	0.21	–	0.95	0.84	12.81	0.38	1.25	–	83.56
4	0.38	–	0.97	0.8	4.39	0.13	1.37	0.12	91.84
5	0.22	–	0.97	0.69	–	0.31	1.27	0.09	96.45
6	0.37	0.69	0.67	0.66	–	0.18	1.45	0.16	95.82
7	0.36	–	0.95	0.85	–	0.22	1.27	0.45	94.9
8	0.31	–	0.87	0.71	–	0.13	1.16	0.12	96.7

Таблица 3 – Элементный состав диффузионного слоя на стали 5ХНМ после боромеднения+ЭПО (масс.%)

Table 3 – Elemental composition of the diffusion layer on 5KhNM steel after borocoppering + EBP (wt.%).

Точки спектра	C	Cr	B	Mo	Ni	Cu	Fe
1	0.34	0.42	10.74	0.15	0.65	0.06	87.64
2	0.58	0.7	8.47	0.08	0.84	0.12	89.21
3	0.32	0.48	7.32	0.16	0.94	–	90.78
4	0.22	0.33	7.55	0.38	0.68	–	90.84
5	0.12	0.35	5.96	0.26	0.48	–	92.83
6	0.37	0.37	4.97	0.16	0.8	0.06	93.27
7	0.37	0.37	3.88	0.14	0.9	0.02	94.32

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ БОРИДНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ
НА ПОВЕРХНОСТИ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 5ХНМ

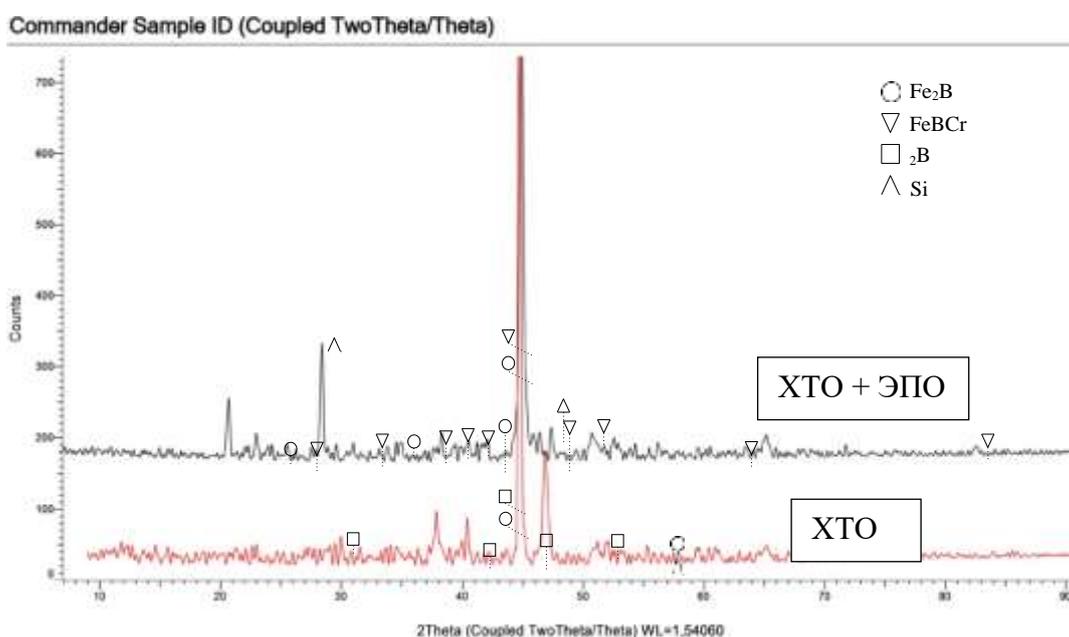


Рисунок 8 – Рентгенограмма образца из стали 5ХНМ
Figure 8 – XRD pattern of 5KhNM steel

РФА анализ стали 5ХНМ после боромеднения выявил на наличие фаз Fe_2B и Cr_2B . Высокобористая фаза FeB не найдена. Делая выводы из данных таблицы 2, где в точке спектра № 1 указано максимальное количество бора, что соответствует фазе FeB , стоит предположить, что данная фаза присутствует, но в очень малом количестве. После проведения боромеднения

совместно с ЭПО фазовый состав состоит из FeB и Fe_2B , с преобладающей фазой FeB .

С целью оценки хрупкости полученных слоев определяли величину предельной пластичности $\epsilon_{пред.}$ по формуле $\epsilon_{пред.} = D_{отп.} / L_{тр.}[11]$, где $D_{отп.}$ – диагональ отпечатка, $L_{тр.}$ – длина трещины между отпечатками (рис. 9, таблица 4).

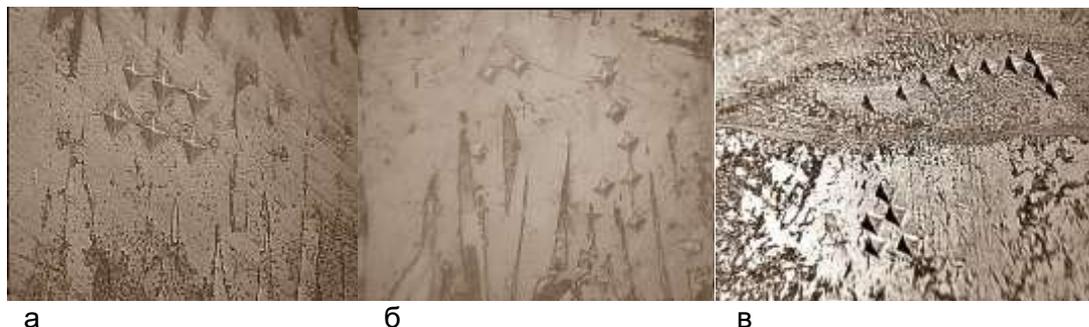


Рисунок 9 – Микроструктура стали 5ХНМ в ходе измерения величины предельной пластичности после: а) борирования; б) боромеднения; в) боромеднения+ЭПО

Figure 9 – Microstructure of 5KhNM steel during the measurement of the maximum plasticity after: a) borings; b) borocoppering; c) borocoppering + EBP

Таблица 4 – Результаты измерения величины предельной пластичности

Table 4 – The results of the plasticity evaluation

$D_{отп.}$	$L_{тр.}$	$\epsilon_{пред.}$			
Борирование			Боромеднение		
4.23	3.68	1.14	5.98	3.21	1.86
4.76	3.22	1.47	8.24	3.28	2.51
3.63	2.88	1.26	7.87	4.34	1.81
3.91	2.95	1.32	9.01	4.77	1.88
Боромеднение + ЭПО (трещин между отпечатками не обнаружено)					

Из результатов исследований следует, что по сравнению с «классическим» борированием при боромеднении величина пластической деформации увеличивается в 1.5–1.7 раза. Скорее всего, увеличение величины пластической деформации связано с образованием фазы Fe₂V. При боромеднении с последующим воздействием электронного пучка наличие трещин между отпечатками не обнаружено (рис. 9, в).

ВЫВОДЫ

1) В результате боромеднения толщина диффузионного слоя равнялась 205–215 мкм, при последующем воздействии электронного пучка прирост толщины составил 25–45 мкм.

2) Микротвердость слоя после ЭПО снизилась до 1390 HV по сравнению с боромеднением, после которого максимальное значение микротвердости равнялось 1750 HV.

3) Величина предельной пластичности при боромеднении в 1.5–1.7 раз выше по сравнению с чистым борированием. При боромеднении+ЭПО наличие трещин между отпечатками не обнаружено, что свидетельствует о высокой пластичности модифицированного слоя, превосходящей исходный диффузионный слой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование изменения размеров образцов из стали 5ХНМ после борирования / Л.А. Куркина [и др.] // *Обработка металлов*. 2012. №2(55). С. 62–64.
2. Одарченко В.И., Казначеева Д.А., Щербатов В.Г. Исследование борирования сплавов на железной основе при различных температурах // *XXIII ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ)* Казань: КНИТУ-КАИ. 2017 г. С. 328–332.
3. Гуляшинов П.А. Влияние борирования и алитирования на структуру и микротвердость низкоуглеродистых сталей // *Обработка металлов (технология-оборудование-инструменты)*. 2022. № 2 (Т. 24). С. 91–101. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-91-101.
4. Мустафина Т.В., Мустафин Г.А., Марширов И.В. Оптимизация процесса борирования чугуна при литье // *Ползуновский вестник*. 2015. № 3. С. 15–19.
5. Buchwalder A., Zenker R. Pre- and post-surface treatments using electron beam technology for load-related application of thermochemical and PVD hard coatings on soft substrate materials. *Surf. Coat. Technol.* 2019, 375, 920–932.
6. Ващук Е.С., Будовских Е.А., Громов В.Е., Батаев В.А., Иванов Ю.Ф. Модификация стали 45 методами электровзрывного боромеднения и последующей электронно-пучковой обработкой //

9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск: БГУ. 2011. С. 201–203.

7. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 2. / Д.В. Комаров [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2022. № 3. С. 204–215.

8. Generation and propagation of high-current low energy electron beams / Devyatkov V.N. [and others] // *Laser and Particle Beams*. August 2003. Vol. 21. pp. 243–248.

9. Воробьев М.С., Москвин П.В., Шин В.И., Коваль Н.Н., Ашурова К.Т., Дорошкевич С.Ю., Десятков В.Н., Торба М.С., Леванисов В.А. Письма в ЖТФ, 47 (10), 38 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719.

10. Влияние продолжительности боромеднения на толщину диффузионного слоя и микротвердость углеродистых и легированных сталей / С.А. Лысых [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2023. Т. 25, № 1. С. 131–148. DOI/10.17212/1994-6309-2023-25.1-131-148.

11. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. М.: *Металлургия*, 1989. 176 с.

Информация об авторе

С. А. Лысых – м.н.с. лаборатории физического материаловедения ИФМ СО РАН.

У. Л. Мишигдоржийн – к.т.н., заведующий лабораторией физического материаловедения ИФМ СО РАН.

Ю. П. Хараев – д.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения и основы конструирования ВСГУТУ.

П. В. Москвин – м.н.с. лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН.

М. С. Воробьев – д.т.н., с.н.с. лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН.

М. А. Мокеев – инженер лаборатории физического материаловедения ИФМ СО РАН.

Information about the authors

S.A. Lysykh - researcher of the laboratory of physical materials science IPMS SB RAS.

U.L. Mishigdorzhijn - PhD, head of the laboratory of physical materials science IPMS SB RAS.

Yu.P. Kharaev - Dr. Eng., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Design Fundamentals of the ESSTUM.

P.V. Moskvin - researcher of the laboratory of plasma emission electronics IHCE SB RAS.

M.S. Vorobyov - Dr. Eng., senior researcher of the laboratory of plasma emission electronics IHCE SB RAS.

M.A. Mokeev - engineer of the laboratory of physical materials science IPMS SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.

The article was received by the editorial board on 12 Jan 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.