



Научная статья

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

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.023



ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДИФфуЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ БОРОМ И НИКЕЛЕМ

Владимир Иванович Мосоров ¹, Константин Сергеевич Коробков ²,
Бурьял Дондокович Лыгденов ³

^{1, 2, 3} Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

¹ vlmosorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0193-5310>

² k_korobkov00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5192-2140>

³ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5841-0000>

Аннотация. Двухкомпонентное насыщение, при котором два элемента одновременно диффундируют на поверхности стали, приводит к формированию более сложной и многослойной структуры с уникальными свойствами.

В данной статье рассматривается двухкомпонентное насыщение бором и никелем углеродистых сталей. Целью данной работы является исследовать микроструктуру, микротвердость и фазовый состав бороникелированных слоев. Проведен металлографический, рентгенофазовый и рентгеноспектральный анализ, определена микротвердость по глубине диффузионного покрытия. Дана оценка влияния состава насыщающих смесей, используемых в данной работе на формирование пластичности и твердости бороникелированных покрытий.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, двухкомпонентное насыщение, бороникелирование, металлографический анализ, рентгенофазовый анализ, рентгеноспектральный анализ, углеродистая сталь

Для цитирования: Мосоров В. И., Коробков К. С., Лыгденов Б. Д. Исследование микроструктуры и свойств углеродистых сталей при диффузионном насыщении бором и никелем // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 152–156. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.023. EDN: <https://elibrary.ru/LZQJQD>.

Original article

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON STEELS IN DIFFUSION SATURATION WITH BORON AND NICKEL

Vladimir I. Mosorov ¹, Konstantin S. Korobkov ², Buryal D. Lygdenov ³

^{1, 2, 3, 4} East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

¹ vlmosorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0193-5310>

² k_korobkov00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5192-2140>

³ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5841-0000>

Abstract. Two-component saturation, in which two elements simultaneously diffuse on the surface of the steel, leads to the formation of a more complex and multilayer structure with unique properties.

This article discusses the two-component saturation of carbon steels with boron and nickel. The purpose of this work is to investigate the properties, phase composition and microstructure of boronized layers. Metallographic, X-ray phase and X-ray spectral analysis were performed. The micro-hardness of the diffusion coating depth has been determined. The influence of the composition of the saturating mixtures used in this work on the formation of plasticity and hardness of boronized coatings is estimated.

Keywords: chemical and thermal treatment, two-component saturation, boronickeling, metallographic analysis, X-ray phase analysis, X-ray spectral analysis, carbon steel.

For citation: Mosorov, V.I., Korobkov, K.S. & Lygdenov, B.D. (2025). Investigation of microstructure and properties of carbon steels in diffusion saturation with boron and nickel. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 152-156. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.023. EDN: <https://elibrary.ru/LZQJQD>.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное развитие промышленности в современных условиях приводит к ужесточению требований к ресурсу машин и механизмов, поэтому про-

блема совершенствования технологических методов упрочнения конструкционных сталей является актуальной задачей современного машиностроения. Одним из эффективных способов поверхностного упрочнения сталей является химико-термическая

© Мосоров В. И., Коробков К. С., Лыгденов Б. Д., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДИФфуЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ БОРОМ И НИКЕЛЕМ

обработка (ХТО). Это процесс поверхностного насыщения сталей разными элементами, который заключается в изменении химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали [1].

Одним из видов химико-термической обработки является насыщение поверхностного слоя бором, полученные диффузионные слои характеризуются высокой твердостью и износостойкостью, но являются хрупкими и обладают низкой пластичностью.

В данной работе для снижения хрупкости боридных покрытий используется двухкомпонентное диффузионное насыщение бором и никелем. При двухкомпонентном диффузионном насыщении введение никеля делается с целью повысить показатели пластичности и износостойкости боридных слоев. Работы по исследованию на износостойкость бороникелированных слоев проводились в работах [2–8].

Бороникелированные слои показывают хорошие показатели при испытаниях на коррозионностойкость [3]. Также при диффузионном бороникелировании наблюдается снижение микротвердости [9–11]. При рентгенофазовом анализе бороникелированных покрытий на сталях и сплавах были обнаружены, кроме боридных фаз FeB и Fe₂B, следующие фазы: NiB, Ni₂B, Ni₃B и Ni₄B₃ [10, 11].

МЕТОДЫ

В качестве исследуемого материала использовали углеродистые стали 20, 45 и У10.

Бороникелирование на сталях 20, 45 и У10 проводилось в контейнерах с плавким затвором и было проведено следующими составами, представленными в таблице 1, при температуре 950 °С и временем выдержки 4 часа.

Микроструктуру образцов исследовали на металлографическом микроскопе «Neophot-21» с циф-

ровой камерой для фиксации изображений. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,1 кг согласно ГОСТ 9450-76.

Рентгеноспектральный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-X-RAY;

Таблица 1 – Составы смеси при бороникелировании в порошках

Table 1 – Compositions of the mixture during boronickeling in powders

№ состава	1	2
B ₄ C	60	65
Al ₂ O ₃	21	18
NiO	12	12
NH ₄ Cl	4	-
K(BF ₄)	3	5

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате диффузионного насыщения были получены следующие бороникелированные слои: микроструктуры состава № 1 – рисунок 1, микроструктуры состава № 2 – рисунок 2.

Глубина диффузионных бороникелированных слоев состав № 1 составила: на стали 20 – 135 мкм; стали 45 – 130 мкм, стали У10 – 125 мкм.

Глубина диффузионных бороникелированных слоев состав № 2 составила: на стали 20 – 195 мкм; стали 45 – 190 мкм, стали У10 – 180 мкм.

Уменьшение толщины диффузионных бороникелированных слоев связано с увеличением содержания углерода в сталях.

Микротвердость по глубине диффузионных слоев на сталях 20, 45 и У10 распределяется неравномерно.

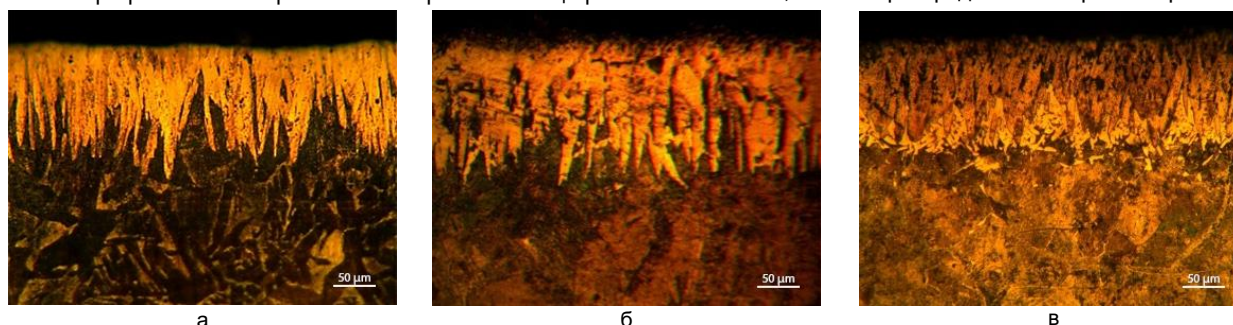


Рисунок 1 – Микроструктуры бороникелированных слоев на сталях состав № 1, при увеличении ×400: а) сталь 20; б) сталь 45; в) сталь У10

Figure 1 – Microstructures of boronickelized layers on steels composition №1, with an increase of ×400: а) steel 20; б) steel 45; в) steel U10

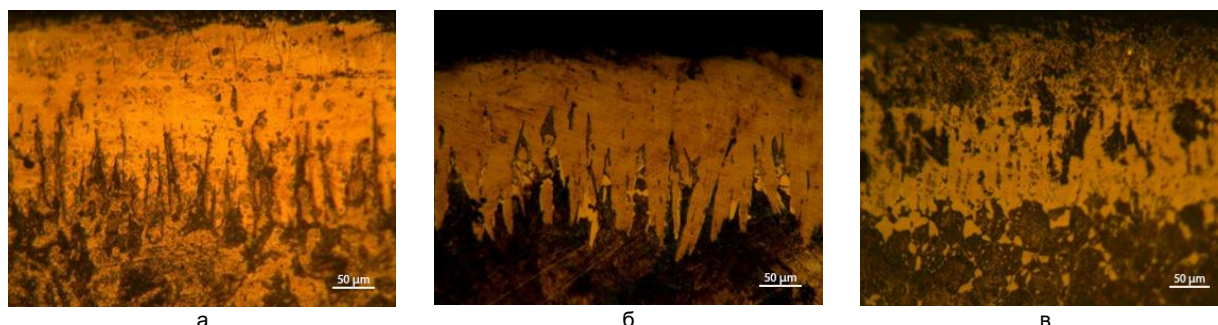


Рисунок 2 – Микроструктуры бороникелированных слоев на сталях состав № 2, при увеличении ×400: а) сталь 20; б) сталь 45; в) сталь У10

Figure 2 – Microstructures of boronickelized layers on steels composition № 2, with an increase of ×400: а) steel 20; б) steel 45; в) steel U10

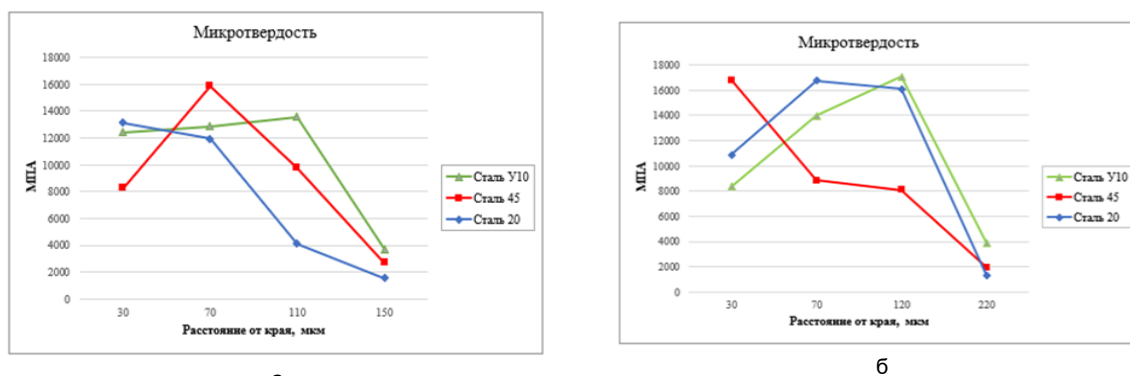


Рисунок 3 – График распределения микротвердости по глубине боронизированных слоев: а) состав № 1; б) состав № 2
Figure 3 – Graph of the micro-hardness distribution over the depth of boronized layers: a) composition № 1; b) composition № 2

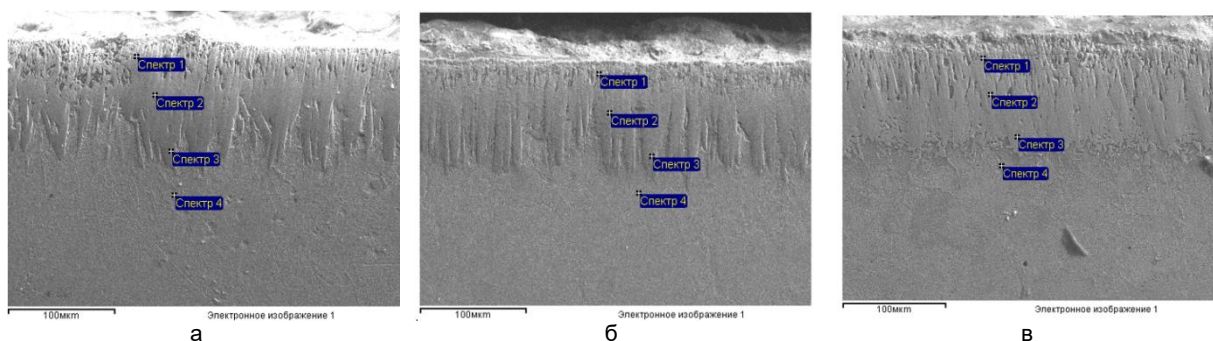


Рисунок 4 – Электронное изображение боронизированных слоев на сталях состав №1, при увеличении $\times 350$:
а) сталь 20; б) сталь 45; в) сталь У10

Figure 4 – Electronic image of boronized layers on steels composition №1, with an increase of $\times 350$:
а) steel 20; б) steel 45; в) steel U10

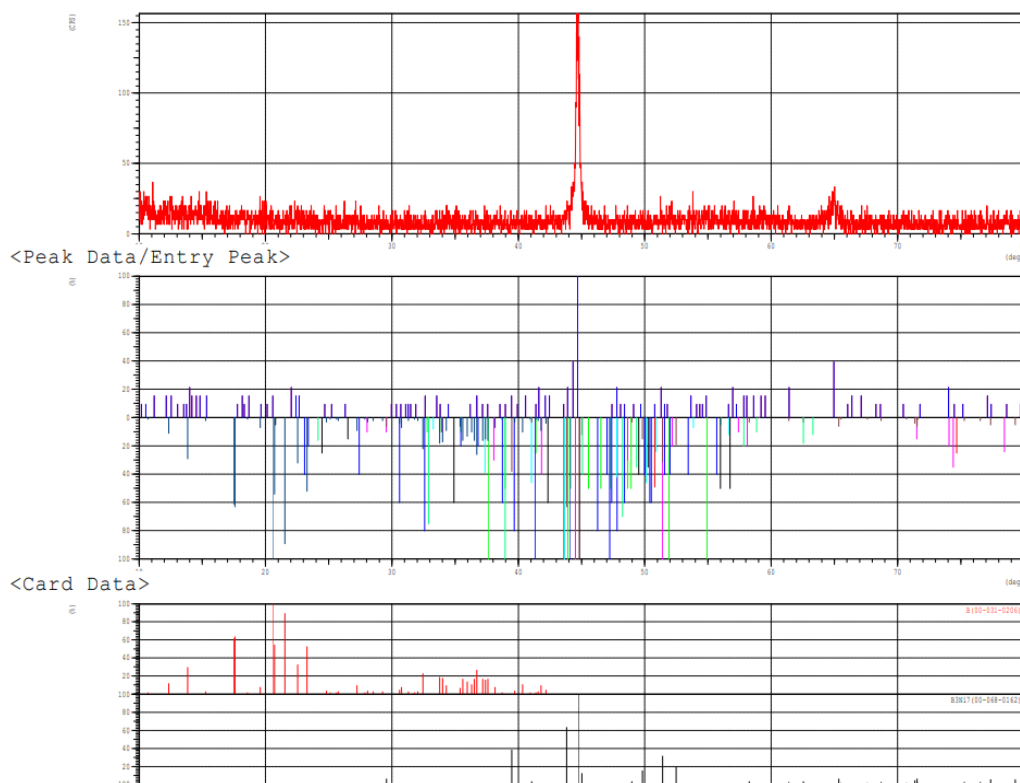


Рисунок 5 – График распределения пиков при определении фаз, состав № 2, сталь У10
Figure 5 – Graph of the distribution of peaks, when determining phases, composition № 2, steel U10

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДИФфуЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ БОРОМ И НИКЕЛЕМ

Микротвердость измеряли на глубине от поверхности 30, 70, 110 и 150 мкм для состава № 1, для состава № 2 – на глубине 30, 70, 120, 220 мкм, данные приведены на графике рисунка 3.

Состав 1 на стали 20 – микротвердость на расстоянии от 30 мкм 13125 МПа, на расстоянии 70 мкм уменьшилась до 11944 МПа; Сталь 45 – микротвердость на расстоянии от 30 мкм 8271 МПа, на расстоянии 70 мкм увеличилась до 15852 МПа; Сталь У10 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 12435 МПа, на расстоянии 70 мкм не изменилась 12845 МПа, на расстоянии 110 мкм 13548 МПа.

При составе 2 на стали 20 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 10870 МПа, при 70 мкм увеличилась до 16764 МПа; Сталь 45 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 16799 МПа, при 70 мкм уменьшилась до 8841 МПа; Сталь У10 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 8363 МПа, при 70 мкм увеличилась до 13966 МПа, при 120 мкм 17049 МПа.

Электронные изображения бороникелированных слоев углеродистых сталей состава № 1 рентгеноспектрального микроанализа представлены на рисунке 4.

No.	Card	Chemical Formula	Chemical Name {Mineral Name}
1	00-031-0206	B	Boron
2	00-068-0162	B ₃ Ni ₇	Boron Nickel
3	00-047-1405	Fe _{0.64} Ni _{0.36}	Iron Nickel
4	00-035-1339	BFe ₃	Boron Iron
5	00-012-0416	Ni ₄ B ₃	Boron Nickel
6	00-036-0978	Fe _x Ni _{23-x} B ₆	Boron Iron Nickel
7	00-047-1332	B ₆ Fe ₂₃	Boron Iron
8	00-039-1314	Fe ₂ B	Boron Iron
9	00-006-0567	NiB	Boron Nickel

Содержание Ni в бороникелированном слое на стали 20 составило 0,09–0,19 %.

Содержание Ni в бороникелированном слое на стали 45 составило 0,24–0,99 %.

Содержание Ni в бороникелированном слое на стали У10 составило 0,18–0,62 %.

На всех образцах содержание Ni уменьшается по мере удаления от поверхности.

График распределения пиков при определении фаз и их идентификация рентгенофазовым анализом на бороникелированном слое стали У10 состав № 2 представлены на рисунках 5, 6. Для идентификации фаз использовалась база данных PDF-2, рентгеновская трубка с анодом меди (Cu Kα, λ = 1.5406 Å), для количественного анализа использован метод Ритвельда. В результате рентгенофазового анализа в бороникелированном слое была найдена фаза B₃Ni₇ и химический элемент В. По отношению друг к другу фазы на основе В составляют 57.32 %, а фаза B₃Ni₇ составляет 42.68 %.

S	L	d	I	R
Dx	WT%	S.G.		
0.413	0.571 (28/49)	0.771	0.355	0.156
	2.33	57.32	P41	
0.718	0.750 (21/41)	0.639	0.401	0.192
	7.97	42.68	P63mc	
0.155	1.000 (3/5)	0.855	0.611	0.523
	8.15	-----	Fm-3m	
0.226	0.800 (12/15)	0.808	0.537	0.347
	7.44	-----	Pnma	
0.206	0.640 (16/25)	0.717	0.725	0.333
	7.43	-----	C2/c	
0.556	0.933 (14/18)	0.595	0.580	0.323
	7.90	-----	Fm-3m	
0.278	0.900 (9/10)	0.630	0.464	0.263
	7.19	-----	Fm-3m	
0.465	0.800 (8/10)	0.590	0.458	0.216
	7.24	-----	I	
0.306	0.700 (7/10)	0.629	0.294	0.130
	7.18	-----	Cmcm	

Рисунок 6 – Идентифицированные фазы образца бороникелированного слоя стали У10

Figure 6 – Identified phases of the boron nickel-plated layer sample made of U10 steel

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам измерения микротвердости можно сделать вывод, что Ni на стали 45 при составе № 1 и на сталях 20 и У10 при составе № 2 диффундирует в верхние слои, так как снижается твердость, а также повышает пластичность бороникелированных слоев на глубине 30 мкм 8271–10870 МПа, в глубь Ni проникает меньше, и твердость на расстоянии 70 мкм возрастает до 15852–17049 МПа.

Глубина бороникелированных слоев при составе 2 больше состава 1 на 50–60 мкм.

Содержание Ni в диффузионных слоях составило на поверхности до 0,99 %.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что двухкомпонентное диффузионное насыщение бором и никелем является эффективным способом для повышения пластичности боридных покрытий.

Марки сталей, используемые в работе, показывают разную чувствительность к процессу бороникелирования:

Сталь 20: хорошо реагирует на процесс, обес-

печивая высокую твердость, но требует осторожности при выборе состава из-за риска хрупкости.

Сталь 45 образует более равномерные слои, что делает ее подходящей для широкого спектра применений.

Сталь У10 показывает наиболее стабильное снижение по микротвердости и наличие Ni, что делает ее оптимальной для ответственных деталей.

Влияние состава насыщающей смеси на свойства покрытий:

Состав № 1 эффективен для получения высокой поверхностной твердости, но его применение ограничено из-за повышенной хрупкости.

Состав № 2 обеспечивает оптимальный баланс между твердостью и пластичностью за счет фазы B₃Ni₇, что делает его предпочтительным для деталей, работающих в условиях интенсивного износа.

Результаты исследований выполнены при финансовой поддержке ФГБОУ ВО ВСГУТУ в рамках гранта «Молодые ученые ВСГУТУ» (Приказ 11760д от 27.04.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ляхович Л.С. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : Справочник. М., 1981. 229 с.
2. Определение износостойкости диффузионных покрытий после химико-термической обработки в обмазке на основе карбида бора с добавлением никеля / Ж.В. Самаев [и др.] // Ползуновский альманах. 2019. Т. 5. № 3. С. 41–54.
3. Повышение износостойкости и коррозионной стойкости стальных деталей методами комплексного бороникелирования и боровольфрамирания / С.Г. Иванов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2010. Т. 7. № 4. С. 108–111.
4. Перспективные диффузионные покрытия / Б.Д. Лыгденев [и др.]. Raleigh, NorthCarolina, 2015. 131 с.
5. Борирование малоуглеродистой стали / А.М. Гурьев [и др.] // Raleigh, NorthCarolina, 2015. С. 572–573.
6. Упрочнение поверхности литой стали комплексным диффузионным насыщением бором и хромом / В.И. Мосоров [и др.] // Обработка металлов. 2011. № 2. С. 33–36.
7. Лыгденев Б.Д. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 45 и 5ХНВ // Вестник ВСГУТУ. 2011. № 1. С. 25–31.
8. Распределение фаз в боридном слое на стали 45 / В.И. Мосоров [и др.] // Ползуновский Альманах. 2017. № 4. С. 137–142.
9. Иванов С.Г. Влияние добавок легирующих элементов в обмазку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали / С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, А.Г. Иванов, А.М. Гурьев // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 7. С. 170–172.
10. Ocak-Araz S., Birden A., Bayca S.U. [et al.]. Effect

of Powder-Pack Boronizing on the Micro-hardness, Wear, and Corrosion Behaviors of AISI 304L Steel. J. of Materi Eng and Perform 33, 166–172. (2024).

11. GUNES I., KEDDAM M., CHEGROUNE R. [et al.]. Growth kinetics of boride layers formed on 99.0 % purity nickel. Bull Mater Sci 38, 1113–1118. (2015).

Информация об авторах

В. И. Мосоров – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского университета технологий и управления.

К. С. Коробков – аспирант кафедры «Металловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского университета технологий и управления.

Б. Д. Лыгденев – доктор технических наук, профессор Уханьского текстильного университета.

Information about the authors

V.I. Mosorov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Metallurgy and Materials Processing Technologies" of the East Siberian University of Technology and Management.

K.S. Korobkov - postgraduate student of the Department "Metallurgy and Materials Processing Technologies" of the East Siberian University of Technology and Management.

B.D. Lygdenov - Doctor of Technical Sciences, Professor of Wuhan.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 08 Nov 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.