

Научная статья

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

УДК 669.1, 621.78

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.009

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО БОРОХРОМИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛЕЙ AISI H12 И ASTM L6

Цюань Чжэн^{1†}, Михаил Алексеевич Гурьев², Шунчи Мэй³, Евгения Владимировна Черных⁴, Бурьял Дондокович Лыгденов⁵, Алексей Михайлович Гурьев⁶, Елена Алексеевна Кошелева⁷

^{1, 2, 3, 5, 6} Уханьский текстильный университет, ул. Фангжи, 1, 430073, Ухань, КНР

^{1, 2, 4, 6, 7} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

² Чжэцзян Бриллиант Холодильное Оборудование Ко., ООО, Руао Промышленный парк, Синчан, провинция Чжэцзян, 312500, КНР

¹ 361870277@qq.com[†], <https://orcid.org/0000-0002-4596-1302>

² gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

³ 1533876320@qq.com

⁴ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

⁵ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-6165>

⁶ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

⁷ kosheleva_ea@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается широкое применение инструментальных сталей AISI H12 и ASTM L6 в промышленном секторе, а также требования к обработке их поверхности. Для увеличения твердости и износостойкости инструментальных сталей, а также решения проблемы недостаточной прочности соединения боридного слоя с основным материалом, предложен метод комплексного насыщения бором и хромом. Борохромирование улучшает твердость и пластичность боридного слоя, а также решает проблему его скалывания и низкой термостойкости. С помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) были исследованы микроструктуры борохромированного слоя и его высокотемпературная устойчивость. Результаты показали, что при увеличении содержания Cr_2O_3 до 2 %, слой становится более плотным, толщина слоя AISI H12 и ASTM L6 увеличивается до 55,4 мкм и 33,4 мкм соответственно и увеличивает разгаростойкость поверхности. Это исследование предоставляет важные указания и рекомендации для улучшения свойств сталей для штампового инструмента горячего деформирования и увеличения его срока службы.

Ключевые слова: борирование, диффузия, горячештамповые стали, структура, жаростойкость.

Благодарности: Металлографические исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ.

Для цитирования: Чжэн Ц., Гурьев М.А., Мэй Ш., Черных Е.В., Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Кошелева Е.А. Исследование влияния термодиффузионного борохромирования на структуру и свойства сталей AISI H12 и ASTM L6 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 2. С. 212–219. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.009.

Original article

THE EFFECT OF THERMODIFFUSION BOROCHROMIZING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AISI H12 AND ASTM L6 STEEL

Quan Zheng^{1†}, Mikhail A. Guryev², Shunqi Mei³, Evgeniya V. Chernykh⁴, Buryal D. Lygdenov⁵, Alexey M. Guryev⁶, Elena A. Kosheleva⁷

^{1, 2, 3, 5, 6} Wuhan Textile University, Fangzhi Av., 1, Wuhan, 430200, China

^{1, 2, 4, 6, 7} I. I. Polzunov Altai State technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

² Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd., Ruao Industry Park, Xingchang, Zhejiang Province, 312500, China

¹ 361870277@qq.com[†], <https://orcid.org/0000-0002-4596-1302>

² gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

³ 1533876320@qq.com

⁴ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

⁵ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-6165>

⁶ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

⁷ kosheleva_ea@mail.ru

Abstract. The paper explores the extensive applications of AISI H12 and ASTM L6 tool steels in the industrial sector, along with their surface treatment requirements. To enhance the hardness and wear resistance of tool steels and address the insufficient bonding strength between boride layers and substrates, the paper proposes a boron-chromium saturation diffusion strengthening method. This method involves simultaneous infusion of boron and chromium to form a boron-chromium layer, improving the performance and bonding strength of boride layers while addressing their brittleness and low high-temperature oxidation resistance. The microstructure and high-temperature oxidation resistance of boride layers were studied using scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that when the Cr_2O_3 content increases to 2 %, a dense structure forms in the diffusion layer, leading to thickness increases in AISI H12 and ASTM L6 tool steels to 55.4 μm and 33.4 μm , respectively, with ASTM L6 steel exhibiting notable high-temperature oxidation resistance. This study provides significant references and guidance for enhancing the performance and prolonging the service life of tool steels.

Keywords: boriding, diffusion, hot-stamp steels, structure, heat resistance.

Acknowledgments: The metallographic research was carried out at the AltSTU Shared Use Center.

For citation: Zheng, Q., Guryev, M. A., Mei, S., Chernykh, E. V., Lygdenov, B. D., Guryev, A. M. & Kosheleva, E. A. (2024). The effect of thermodiffusion borochromizing on the structure and properties of AISI H12 and ASTM L6 steel. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(2), 212–219. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.02.009.

Введение

Инструментальные стали, такие как AISI H12 (4X4BMФC(ДИ22)) и ASTM L6 (5XHM) широко применяются в промышленности благодаря своей высокой износостойкости, термо- и разгаростойкости. Основная область применения этих сталей – штампы горячего деформирования металлов и сплавов, а также пресс-формы машин для литья под давлением цветных металлов и их сплавов [1-4]. При эксплуатации оснастка и инструмент из этих сталей в основном выходит из строя в результате поломок, вызванных образованием разгарных трещин [5-6]. Поэтому поверхность инструментальных сталей AISI H12 и ASTM L6 должна обладать высокой термостойкостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Процесс борирования является распространенным методом поверхностной обработки инструментальных сталей. Он заключается в внедрении бора в поверхность стали при высокой температуре и формирования боридного слоя, что увеличивает твердость и износостойкость материала [7-10]. После борирования инструментальные стали обладают износостойкостью, что делает их подходящими для длительной работы в условиях высокой нагрузки, увеличивая срок службы и снижая затраты на обслуживание. Однако процесс борирования инструментальных сталей также имеет свои проблемы, например, недостаточную прочность соединения боридного слоя с основным материалом, что может привести к отслаиванию при высоких напряжениях.

Для дальнейшего улучшения свойств боридного слоя и решения проблем с его скалыванием и низкой термостойкостью, применяют комплексное борирование совместно с другими металлическими элементами, что показало хорошие результаты [11-15]. Одним из распространенных методов является использование комплексного борхромирования, то есть одновременное внедрение бора и хрома [15-18]. Это не только повышает твердость, разгаростойкость и износостойкость, но также улучшает прочность соединения боридного слоя с основным материалом, уменьшая риск отслаивания и улучшая общие характеристики и срок службы инструментальных сталей.

Методика и материалы

В данном исследовании использовались стали AISI H12 и ASTM L6, химические составы которых приведены в таблице 1. Перед нанесением бора поверхность образцов была зачищена наждачной бумагой зернистостью 800-1000 и очищена ультразвуком в спирте.

В качестве насыщающей среды использовали оригинальные составы, состоящие из следующих компонентов: 70 % B_4C , 5% KBF_4 , 10 % C , 12-13 % бентонита и 1-2 % Cr_2O_3 . Борировочный агент смешивали с водой для получения пасты и равномерно наносили на поверхность стали слоем толщиной около 5 мм. Образцы помещали в камерную печь типа СНОЛ и подвергали борированию при температуре 950 °С в течение 4 ч. После термообработки образцы охлаждали с печью.

Таблица 1. Химический состав использованных в работе сталей

Table 1. Chemical composition of steels used in the work

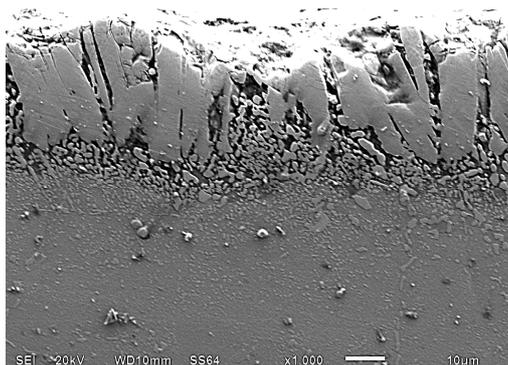
Марка стали	Элементный состав, масс. %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	W	P	S
5ХНМ (AISI L6)	0,50- 0,60	0,10- 0,40	0,50- 0,80	0,50- 0,80	0,15- 0,30	–	1,40- 1,80	–	≤0,030	≤0,030
4Х4ВМФС(ДИ22) AISI H12	0,37- 0,44	0,60- 1,00	0,20- 0,50	3,20- 4,00	1,20- 1,50	0,60- 0,90	≤0,60	0,80- 1,20		

Микроструктуру борированного слоя изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе TESCAN MIRA LMS. Исследования на жаростойкость борированных сталей производили путем помещения их в камерную при температуре 800 °С с выдержкой при этой температуре в течение 6 ч. Микроструктура окисленных поверхностей и поперечных сечений образцов после окисления была проанализирована с помощью СЭМ. Пробоподготовку образцов для проведения металлографических исследований осуществляли по методикам, описанным в [19-21].

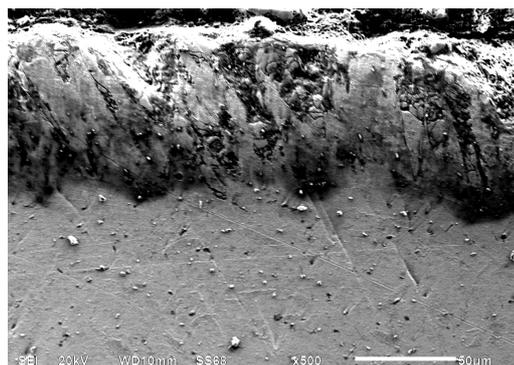
Результаты и обсуждение

На рисунке 1 изображены микроструктуры диффузионных многокомпонентных слоев на основе бора на стали 4Х4ВМФС (ДИ22, AISI H12) при различных содержаниях в насыщающей пасте Cr_2O_3 . Содержание Cr_2O_3 в данном случае принимали равным 1 и 2 масс. % (рис.1). Диффузионный слой имеет среднюю толщину,

равную 32,7 мкм при содержании Cr_2O_3 1 % (рис.1а), но обладает многочисленными порами. При увеличении содержания Cr_2O_3 до 2 %, диффузионный слой образует плотную структуру, а его толщина увеличивается до 55,4 мкм (рис.1б). При этом микроструктура диффузионного слоя претерпевает значительные изменения: при большем содержании Cr_2O_3 в насыщающей смеси, боридный слой уплотняется настолько, что его игольчатое строение не определяется явно. Кроме того, микроструктура переходной зоны не имеет явных отличий от микроструктуры основного материала. Тогда как при 1 масс. % содержания Cr_2O_3 в насыщающей смеси боридный слой имеет характерное игольчатое строение с закругленными концами боридных игл, под слоем имеется явно выраженная переходная зона, определяемая по нодулярным выделениям комплексных соединений железа, бора и углерода, дополнительно легированных хромом, вольфрамом и молибденом.



а)



б)

Рис.1. Микроструктура диффузионных многокомпонентных слоев на основе бора на стали 4Х4ВМФС (ДИ22, AISI H12) при различных содержаниях Cr_2O_3 : (а) 1 %, (б) 2 %

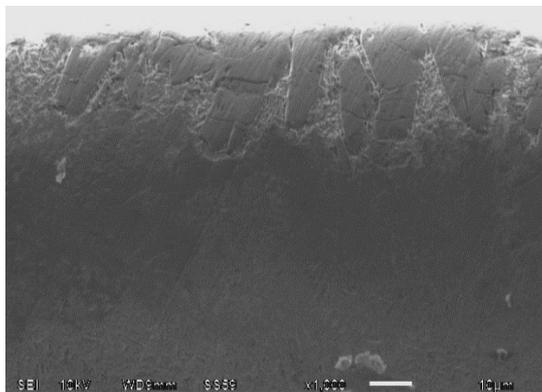
Fig.1. Microstructure of diffusion multi-component layers based on boron on steel 4X4VMFS (DI22, AISI H12) at different Cr_2O_3 contents: (a) 1 %, (b) 2 %

На рисунке 2 изображены микроструктуры диффузионных многокомпонентных слоев на основе бора на стали ASTM L6 при содержании

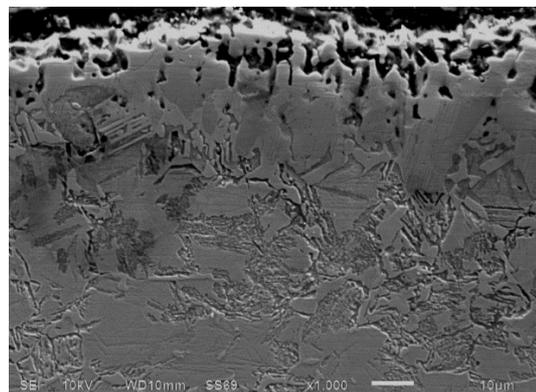
в насыщающей пасте Cr_2O_3 в количестве 1 и 2 масс. % (рис.2) увеличение содержания Cr_2O_3 более 2 масс. %, в этом случае приводит к фор-

мированию пористых, хрупких слоев, имеющих тенденцию к самопроизвольному скалыванию. Диффузионный слой имеет среднюю толщину, равную 29,6 мкм при содержании Cr_2O_3 1 % (рис.2а), но представлен разрозненными единичными иглами, имеющими закругленные концы. При увеличении содержания Cr_2O_3 до

2 %, диффузионный слой образует более плотную структуру, а его толщина увеличивается до 33,4 мкм (рис.2б). В верхней части боридного слоя наблюдаются многочисленные поры, имеющие открытый характер и протяженность в направлении нормали к поверхности.



а)



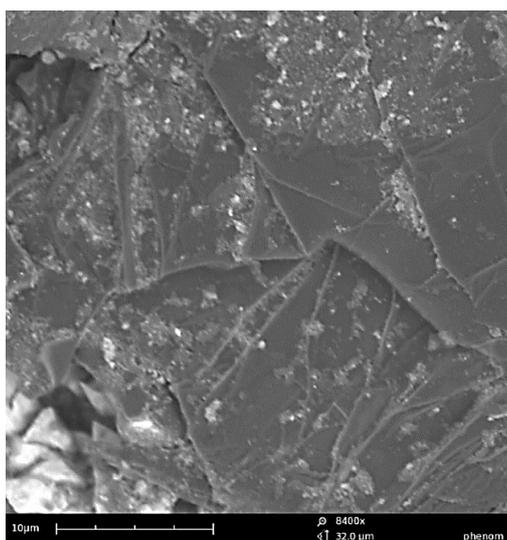
б)

Рис.2. Микроструктура диффузионных многокомпонентных слоев на основе бора на стали ASTM L6 при различных содержаниях Cr_2O_3 : (а) 1 %, (б) 2 %

Fig.2. Microstructure of boron-based diffusion multicomponent layers on ASTM L6 steel at different Cr_2O_3 contents: (a) 1 %, (b) 2 %

Исследования поверхности диффузионных покрытий на стали ASTM L6, показали, что введение 1 и 2 масс. % Cr_2O_3 в борлирующую смесь приводят к изменению морфологии поверхности боридного слоя (рис.3): в случае введения 1 масс. % Cr_2O_3 поверхность боридно-

го слоя имеет гладкую морфологию, тогда как при введении 2 масс. % Cr_2O_3 морфология поверхности боридного слоя меняется на складчатую, что в свою очередь, выглядит на поперечных шлифах диффузионного слоя как пористость.



а)



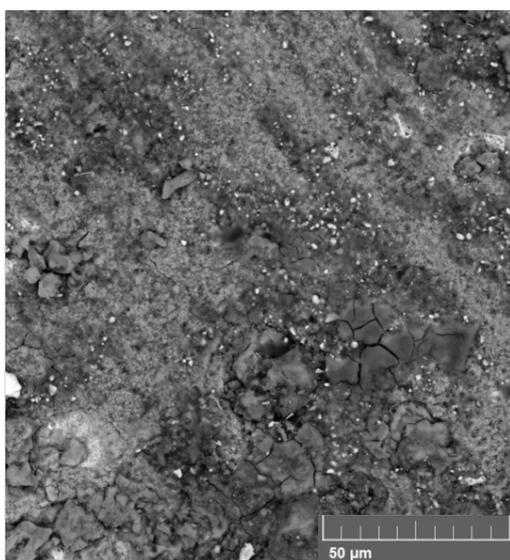
б)

Рис.3. Морфология поверхности боридного слоя на стали ASTM L6 при различных содержаниях Cr_2O_3 : (а) 1 %, (б) 2 %

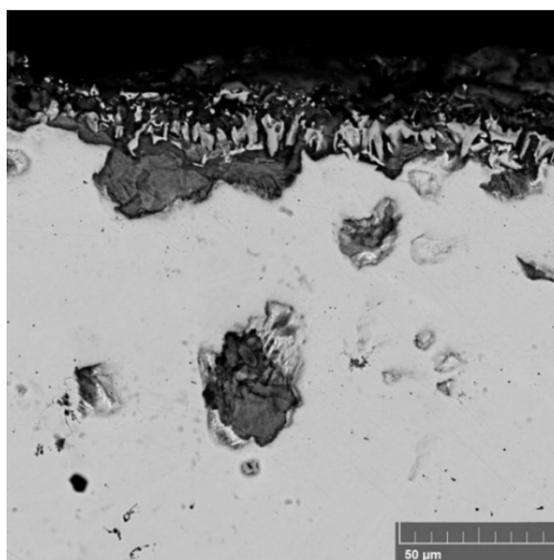
Fig.3. Surface morphology of the boride layer on ASTM L6 steel at various Cr_2O_3 contents: (a) 1 %, (b) 2 %

Как видно из рисунка 4, после высокотемпературного окисления на поверхности окисленного боридного слоя на стали ASTM L6 наблюдаются точечные очаги интенсивной коррозии с характерными повреждениями в виде трещин (рис.4а). На поперечном сечении диффузионного слоя после испытаний на высокотемпературную коррозию видно, что окислению подвергся как сам боридный слой, так и переходная зона под ним (рис.4б). Исходя из строения диффузионного покрытия стали ASTM L6 после высокотемпературного окисления при 800 °С в течение 6 ч, столь интен-

сивная коррозия диффузионного покрытия по сравнению со сталью AISI H12 наблюдается в силу того, что сталь AISI H12 имеет большее содержание легирующих элементов, среди которых имеется также и кремний, который значительно повышает стойкость сталей к высокотемпературному окислению. При этом содержание хрома в самой стали AISI H12 также несколько выше по сравнению со сталью ASTM L6, что также положительно сказывается на повышении стойкости упрочняющего слоя к высокотемпературному окислению.



а)



б)

Рис.4. Поперечное сечение боридного слоя на стали ASTM L6 после высокотемпературного окисления при 800 °С в течение 6 ч

Fig.4. Cross section of boride layer on ASTM L6 steel after high temperature oxidation at 800 °С for 6 h

Закключение

В данной работе предложен метод одно-временной диффузии насыщения бора и хрома в инструментальную сталь, а также проанализированы микроструктура и стойкость боридного слоя к высокотемпературному окислению. Результаты исследования показывают, что:

1) при увеличении содержания Cr_2O_3 в боридирующей смеси с 1 до 2 масс. %, диффузионный слой образует плотную структуру на стали AISI H12, а его толщина увеличивается до 55,4 мкм. Кроме того, микроструктура переходной зоны не имеет явных отличий от микроструктуры основного материала. Аналогичным образом, диффузионный слой стали ASTM L6 образует более плотную структуру, а его толщина увеличивается до 33,4 мкм;

2) в верхней части боридного слоя на стали ASTM L6 наблюдаются многочисленные поры, имеющие открытый характер и протяженность в направлении нормали к поверхности. После высокотемпературного окисления на поверхности окисленного боридного слоя на стали ASTM L6 наблюдаются точечные очаги интенсивной коррозии с характерными повреждениями в виде трещин.

Список литературы

1. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Чжен Ц., Самаев Ж.В., Кошелева Е.А. Некоторые аспекты формирования диффузионного слоя при комплексном борировании инструментальной стали // Ползуновский альманах. 2021. № 3. С. 67–71.
2. Володин Т.В., Карасев А.В., Володин

- В.Л. Повышение прочностных и эксплуатационных свойств инструментальных сталей и инструмента импульсным высокоэнергетическим методом воздействия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 6. С. 56–61.
3. Guryev A.M., Ivanov S.G. Guryev M.A., Chernykh E.V. Structural Factors of Hardening of U8A Carbon Tool Steel under Cyclic Heat Exposure // *Technical Physics*. 2023. V. 68, N 8. P. 171–176.
4. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П., Лыгденев Б.Д., Черных Е.В. Циклическое тепловое воздействие при термической и химико-термической обработке инструментальных сталей // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2005. Т. 2, № 3. С. 37–45.
5. Choi J., Choi J., Lee K., Nahmkeon H., Naksoo K. Fatigue Life Prediction Methodology of Hot Work Tool Steel Dies for High-Pressure Die Casting Based on Thermal Stress Analysis // *Metals*. 2022. V. 12, N 10. P. 1744.
6. Wu L., Das S., Gridin W., Leuders S., Kahlert M. et al. Hot work tool steel processed by laser powder bed fusion: A review on most relevant influencing factors // *Advanced Engineering Materials*. 2021. V. 23, N 7. P. 2100049.
7. Emamverdian A.A., Sun Y., Cao C., Pruncu C., Wang Y. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review // *Engineering Failure Analysis*. 2021. V. 129. P. 105678.
8. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Лыгденев Б.Д., Гурьев М.А. Морфология и фазовый состав диффузионного боридного слоя на основе металлографического анализа стали 45 // *Вестник Сибирского государственного промышленного университета*. 2023. Т. 43, № 1. С. 59–65.
9. Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М. Повышение прочности диффузионных карбоборидных покрытий термоциклированием в процессе их получения // В сборнике материалов IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2007» (НиМ–2007). 2007. С. 110–112.
10. Gur'ev A.M., Gur'ev M.A., Ivanov S.G., Chernykh E.V. Diffusion Hardening of Sintered Ceramic W–Co Materials by Simultaneous Diffusion Saturation with Boron, Chromium, and Titanium // *Technical Physics*. 2022. V. 67, N 10. P. 692–695.
11. Гармаева И.А., Гурьев А.М., Иванова Т.Г., Гурьев М.А., Иванов С.Г. Сравнительное исследование насыщающей способности борлирующих сред различного состава // *Письма о материалах*. 2016. Т. 6, № 4(24). С. 262–265.
12. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Деев В.Б., Логинова М.В. Влияние состава борсодержащей активной среды в виде обмазки на структуру и свойства диффузионного слоя деталей из титана // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28, № 1. С. 60–66.
13. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Лыгденев Б.Д. Формирование диффузионного слоя на стали 45 при одновременном насыщении бором, хромом и титаном // *Ползуновский вестник*. 2021. № 2. С. 218–224.
14. Türkmen İ., Yalamaç E. Effect of alternative boronizing mixtures on boride layer and tribological behaviour of boronized SAE 1020 steel // *Metals and Materials International*. 2022. P. 1–15.
15. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. Влияние добавок легирующих элементов в обмазку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали // *Современные наукоемкие технологии*. 2010. № 7. С. 170–172.
16. Zheng Q., Mei Sh., Xiao Zh., Yang J., Chen Z. et al. Effect of cooling methods on the tribological, oxidation and corrosion properties of CeO₂ composite boronizing coatings on 4Cr5MoSiV1 steel // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. V. 30. P. 3807–3821.
17. Zheng Q., Mei Sh., Xiao Zh. Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing // *Ceramics International*. 2024. V. 50, N 6. P. 8760–8776.
18. Mei S., Zhang Y., Zheng Q., Fan Y., Lygdenov B. et al. Compound Boronizing and Its Kinetics Analysis for H13 Steel with Rare Earth CeO₂ and Cr₂O₃ // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. V. 12, N 7. 3636.
19. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гурьев А.М., Романенко В.В. Фазовый анализ боридных комплексных диффузионных слоев на углеродистых сталях при помощи цветного травления // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020. Т. 17, № 1. С. 74–77.
20. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Романенко В.В. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали Х12Ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "ТНХОМЕТ PRO" // *Ползуновский вестник*. 2020. № 2. С. 165–168.

21. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы // Ползуновский вестник. 2020. № 3. С. 102–105.

Информация об авторах

Ц. Чжэн – аспирант Уханьского текстильного университета, Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет, Чжэцзян Бриллиант Холодильное Оборудование Ко., ООО.

Ш. Мэй – доктор технических наук, профессор Уханьского текстильного университета.

Е. В. Черных – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

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

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, профессор Уханьского текстильного университета.

Е. А. Кошелева – кандидат технических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

References

- Lygdenov, B. D., Gur'yev, A. M., Zheng, Q., Samayev Zh. V. & Kosheleva, E. A. (2021). Nekotoryye aspekty formirovaniya diffuzionnogo sloya pri kompleksnom borirovaniy instrumental'noy stali. *Polzunovskiy al'manakh*, (3), 67–71. (In Russ.).
- Volodin, T. V., Karasev, A. V. & Volodin, V. L. (2004). Povysheniye prochnostnykh i ekspluatatsionnykh svoystv instrumental'nykh staley i instrumenta impul'snym vysokoenergeticheskim metodom vozdeystviya. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, (6), 56–61. (In Russ.).
- Guryev, A. M., Ivanov, S. G. Guryev, M. A. & Chernykh, E. V. (2023). Structural Factors of

Hardening of U8A Carbon Tool Steel under Cyclic Heat Exposure. *Technical Physics*, 68(8), 171–176.

4. Gur'yev, A. M., Voroshnin, L. G., Kharayev, Yu. P., Lygdenov, B. D. & Chernykh, E. V. (2005). Tsiklicheskiye teplovoye vozdeystviye pri termicheskoy i khimiko-termicheskoy obrabotke instrumental'nykh staley. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(3), 37–45. (In Russ.).

5. Choi, J., Choi, J., Lee, K., Nahmkeon, H. & Naksoo, K. (2022). Fatigue Life Prediction Methodology of Hot Work Tool Steel Dies for High-Pressure Die Casting Based on Thermal Stress Analysis. *Metals*, 12(10), 1744.

6. Wu, L., Das, S., Gridin, W., Leuders, S. & Kahlert, M. et al. (2021). Hot work tool steel processed by laser powder bed fusion: A review on most relevant influencing factors. *Advanced Engineering Materials*, 23(7), 2100049.

7. Emamverdian, A. A., Sun, Y., Cao, C., Pruncu, C. & Wang, Y. (2021). Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review. *Engineering Failure Analysis*, 129, 105678.

8. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Lygdenov, B. D. & Gur'yev, M. A. (2023). Morfologiya i fazovyy sostav diffuzionnogo boridnogo sloya na osnove metallograficheskogo analiza stali 45. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 43(1), 59–65. (In Russ.).

9. Vlasova, O. A., Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Kosheleva, E. A. & Gur'yev, A. M. (2007). Povysheniye prochnosti diffuzionnykh karboridnykh pokrytiy termotsiklirvaniyem v protsesse ikh polucheniya. *V sbornike materialov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Nauka i molodezh' – 2007» (NiM-2007)*, 110–112. (In Russ.).

10. Gur'ev, A. M., Gur'ev, M. A., Ivanov, S. G. & Chernykh, E. V. (2022). Diffusion Hardening of Sintered Ceramic W–Co Materials by Simultaneous Diffusion Saturation with Boron, Chromium, and Titanium. *Technical Physics*, 67(10), 692–695.

11. Garmayeva, I. A., Gur'yev, A. M., Ivanova, T. G., Gur'yev, M. A. & Ivanov, S. G. (2016). Sravnitel'noye issledovaniye nasyshchayushchey sposobnosti boriruyushchikh sred razlichnogo sostava. *Pis'ma o materialakh*, 6(4(24)), 262–265. (In Russ.).

12. Gur'yev, A. M., Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Deyev, V. B. & Loginova, M. V. (2022). Vliyaniye sostava borsoderzhashchey aktivnoy sredy v vide obmazki na strukturu i svoystva

diffuzionnogo sloya detaley iz titana. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 28(1), 60–66. (In Russ.).

13. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M. & Lygdenov, B. D. (2021). Formirovaniye diffuzionnogo sloya na stali 45 pri odnovremennom nasyshchenii borom, khromom i titanom. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 218–224. (In Russ.).

14. Türkmen, İ. & Yalamaç, E. (2022). Effect of alternative boronizing mixtures on boride layer and tribological behaviour of boronized SAE 1020 steel. *Metals and Materials International*, 1–15.

15. Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Ivanov, A. G. & Gur'yev, A. M. (2010). Vliyaniye dobavok legiruyushchikh elementov v obmazku na protsessy kompleksnogo mnogokomponentnogo difuzionnogo nasyshcheniya stali. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*, (7), 170–172. (In Russ.).

16. Zheng, Q., Mei, Sh., Xiao, Zh., Yang, J. & Chen, Z. et al. (2024). Effect of cooling methods on the tribological, oxidation and corrosion properties of CeO₂ composite boronizing coatings on 4Cr5MoSiV1 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, (30), 3807–3821.

17. Zheng, Q., Mei, Sh. & Xiao, Zh. (2024). Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing. *Ceramics International*, 50(6), 8760–8776.

18. Mei, S., Zhang, Y., Zheng, Q., Fan, Y. & Lygdenov, B. et al. (2022). Compound Boronizing and Its Kinetics Analysis for H13 Steel with Rare Earth CeO₂ and Cr₂O₃. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(7), 3636.

19. Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Gur'yev, A. M. & Romanenko, V. V. (2020). Fazovyy analiz boridnykh kompleksnykh diffuzionnykh sloyev na uglerodistykh stalyakh pri pomoshchi tsvetnogo travleniya. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(1), 74–77. (In

Russ.).

20. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Zemlyakov, S. A., Gur'yev, M. A. & Romanenko, V. V. (2020). Osobennosti metodiki podgotovki obraztsov dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy stali KH12F1 posle tsementatsii v vakuume s primeneniyyem programmnoy kompleksa "THIXOMET PRO". *Polzunovskiy vestnik*, (2), 165–168. (In Russ.).

21. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Zemlyakov, S. A. & Gur'yev, M. A. (2020). Metodika probopodgotovki obraztsov vysokolegirovannykh staley dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 102–105. (In Russ.).

Information about the authors

Q. Zheng – Post-Graduate Student, Wuhan Textile University, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.

S. Mei – PhD, Professor, Wuhan Textile University.

E. V. Chernykh – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

B. D. Lygdenov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Wuhan Textile University.

A. M. Guryev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University.

E. A. Kosheleva – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

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

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 20.05.2024.

The article was received by the editorial board on 12 Apr. 24; approved after reviewing 06 May 24; accepted for publication 20 May 24.