

Научная статья

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

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.011

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ХРОМИСТОГО НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО ЧУГУНА ЧХЗ****Сергей Геннадьевич Иванов^{1†}, Алексей Михайлович Гурьев², Михаил Алексеевич Гурьев³,
Даниил Андреевич Астахов⁴, Никита Вадимович Мальков⁵,
Вероника Викторовна Романенко⁶, Евгения Владимировна Черных⁷**^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия² Уханьский текстильный университет, ул. ФангЖи, 1, 430073, Ухань, КНР¹ serg225582@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>² gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>³ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>⁴ apstahov69@mail.ru⁵ nik777pik@mail.ru⁶ veronika_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2444-4848>⁷ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

Аннотация. В работе представлены исследования влияния термической обработки на микроструктуру, микротвердость и структурно-фазовое состояние образцов хромистого низколегированного износостойкого чугуна марки ЧХЗ. Металлографический анализ осуществляли при помощи металлографического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» и программного комплекса «TixhoMet PRO». Термическую обработку образцов проводили в камерной термической печи типа СНОЛ, оборудованной ПИД-контроллером «Термодат 16-ЕЗ». Температура нагрева под закалку составляла 890 °С, выдержка при этой температуре – 2 ч, после чего образцы извлекали из печи и подвергали остыванию на спокойном воздухе. После остывания до температуры 40-50 °С, образцы подвергали отпуску при температуре 180-200 °С в течение 2 ч. Остывшие после отпуска образцы демонстрировали твердость 54-56 HRC по сравнению с твердостью 320-340 НВ в литом состоянии. Проведенные исследования показали, что при термической обработке основной вклад в повышение твердости износостойкого хромистого чугуна ЧХЗ вносит значительное повышение (в 2-2,5 раза) твердости металлической матрицы в результате твердорастворного упрочнения и частичного выделения мелкодисперсных включений в ней карбидных частиц. Испытания термически обработанных лопаток дробеметной установки, изготовленных из чугуна ЧХЗ показали повышение ресурса работы в 8-11 раз по сравнению с литыми лопатками, не подвергнутыми термической обработке, и в 1,5-2 раза выше по сравнению с серийными лопатками дробеметной установки, изготовленными из чугуна 510Cr2, поставляемыми из КНР.

Ключевые слова: хромистый чугун, термическая обработка, микроструктура, микротвердость.

Благодарности: Исследования выполнены в ИЦ «ХимБиоМаш» ФБГОУ ВО АлтГТУ.

Для цитирования: Иванов С.Г., Гурьев А.М., Гурьев М.А., Астахов Д.А., Мальков Н.В., Романенко В.В., Черных Е.В. Влияние термической обработки на структуру и свойства хромистого низколегированного износостойкого чугуна ЧХЗ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 1. С. 92–98. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.011.

Original article

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF CHROMIUM LOW-ALLOY WEAR-RESISTANT CAST IRON ChKh3****Sergey G. Ivanov^{1†}, Alexey M. Guryev², Mikhail A. Guryev³, Daniil A. Astakhov⁴,
Nikita V. Mal'kov⁵, Veronika V. Romanenko⁶, Evgeniya V. Chernykh⁷**^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia² Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China¹ serg225582@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

² gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

³ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

⁴ apstahov69@mail.ru

⁵ nik777pik@mail.ru

⁶ veronika_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2444-4848>

⁷ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

Abstract. The paper presents studies of the effect of heat treatment on the microstructure, microhardness and structural-phase state of chromium low-alloy wear-resistant cast iron ChKh3 samples. Metallographic analysis was carried out using «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» metallographic microscope and the «ThixoMet PRO» software package. Thermal treatment of the samples was carried out in a chamber thermal furnace of the SNOL type equipped with a PID controller «Termodat 16-E3». The heating temperature for quenching was 890 °C, holding at this temperature for 2 h, after which the samples were removed from the furnace and cooled in still air. After cooling to a temperature of 40-50 °C, the specimens were tempered at a temperature of 180-200 °C for 2 h. The studies performed have shown that during heat treatment, the main contribution to the increase in the hardness of wear-resistant chromium cast iron ChKh3 is made by a significant increase (by 2-2.5 times) the hardness of the metal matrix as a result of solid solution hardening and partial precipitation of fine inclusions in it of carbide particles. Tests of heat-treated shot blast blades made of cast iron ChKh3 showed an increase in service life by 8-11 times compared to cast blades not subjected to heat treatment, and 1.5-2 times higher compared to serial shot blast blades, made of cast iron 510Cr2, supplied from China.

Keywords: chromium cast iron, heat treatment, microstructure, microhardness.

Acknowledgements: The studies were carried out at the Engineering Center "ChemBioMash" AltSTU.

For citation: Ivanov, S. G., Guryev, A. M., Guryev, M. A., Astakhov D. A., Mal'kov N. V., Romanenko V. V. & Chernykh, E. V. (2023). The effect of heat treatment on the structure and properties of chromium low-alloy wear-resistant cast iron ChKh3. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(20), 92–98. (InRuss.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.011.

Введение

Хромистые чугуны с содержанием хрома, начиная с 2 масс. % и до 38 масс. %, обладавая высокой износостойкостью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью в агрессивных средах, нашли широкое применение для изготовления ответственных деталей в различных отраслях машиностроения. Работая в сложных режимах, сочетающих воздействие различных факторов износа и агрессивных сред, детали агрегатов и узлы техники утрачивают свою работоспособность вследствие закономерно протекающих в них разрушающих процессов (трения, коробления, механических нагрузок, экстремально высоких температур и др.). В этом случае правильно выбранный технологический процесс термической обработки детали из хромистых чугунов способен продлить срок её службы.

В этой связи разработка новых эффективных технологий, позволяющих изготовить деталь, отвечающую современным стандартам качества и заданному уровню свойств, является первостепенной задачей современного материаловедения.

В современной технике из всего арсенала способов повышения эксплуатационных характеристик большинства сталей и чугунов наибо-

лее распространенным является термическая обработка (ТО). Кроме того, известно, что прочность литых изделий из чугуна зависит от его химического состава, условий кристаллизации и режимов ТО [1]. Выбор эффективного режима термической обработки может обеспечить заданный набор технологических и функциональных свойств изделия в целом.

Термической обработке легированных чугунов посвящено немало работ. Так, например, авторами [2-5] исследуется влияние термообработки на структуру и свойства хромистых чугунов некоторых марок, предложены рекомендации по их термической обработке. В работе [6] систематизированы известные литературные данные параметров термообработки группы износостойких хромистых чугунов, а также указаны режимы ТО для деталей, работающих в горно-обогательном производстве. Однако, по-прежнему, детальное рассмотрение требует вопрос управления структурой и свойствами отливок из чугуна в процессе термического упрочнения.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью изучения процесса структурообразования хромистых чугунов путем оптимизации режимов их термической обработки.

Цель работы – выявление особенностей изменения микроструктуры и твердости хромистого низколегированного износостойкого чугуна ЧХЗ в результате термической обработки.

Методика и материалы

В качестве объектов исследования были выбраны образцы хромистого низколегированного износостойкого чугуна ЧХЗ. Химический состав хромистых чугунов в соответствии с ГОСТ 7769-82 приведен в табл.1 [7]. Отливки были получены способом литья по газифицируемым моделям. По завершению процесса затвердевания отливок их выбивали и охлаждали на воздухе. Охлажденные отливки очищали от

пригара на дробеметной установке. Из готовых отливок методами гидроабразивной резки отрезали заготовки металлографических темплетов размерами 20x20x40 мм. После этого готовили металлографические образцы, которые сначала вырезали из темплетов на прецизионном отрезном станке «MICROCUT-201», затем осуществляли запрессовку в бакелитовый компаунд. Полученные образцы шлифовались и полировались на автоматическом шлифовально-полировальном станке «DigiPrep-P», а также протравливались последовательно в травителях «Ниталь» и травителе Берахи №3. Исследования микршлифов проводили согласно методикам, приведенным в работах [8, 9].

Таблица 1. Химический состав исследованных плавок хромистых чугунов ЧХЗ

Table 1. Chemical composition of the investigated melts of ChKh3 chromium cast irons

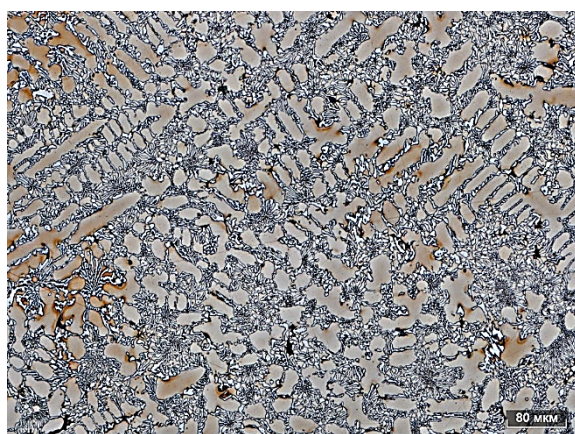
Марка чугуна	C	Si	Mn	S	P	Cr
ЧХЗ по ГОСТ	3-3,8	2,8-3,8	до 1	до 0,12	до 0,3	2,01-3
Исследованная плавка ЧХЗ	3,2±0,037	1,27±0,06	0,73±0,06	0,089±0,0032	0,165±0,0024	2,44±0,11

Металлографический анализ проводился на металлографическом микроскопе «CarlZeissAxioObserverZ1m» и программного комплекса «ThixoMetPRO» по методикам [10-16].

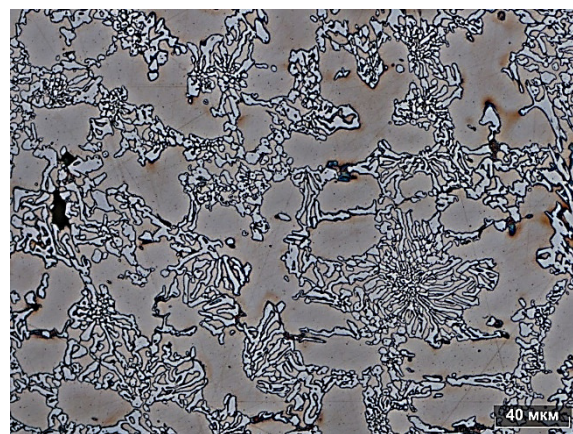
Результаты и обсуждения

Микроструктура образцов чугуна ЧХЗ в исходном (литом) состоянии представлена на рис.1. Как видно из представленного рисунка, при легировании серого чугуна хромом, он приобретает структуру ледобурита, при этом

процесс графитизации полностью подавляется уже при содержании хрома, начиная от 1,6 масс. % [17]. Представленные фотографии микроструктуры чугуна в литом состоянии это полностью подтверждают – панорамный макроструктурный снимок демонстрирует скелетную ледобуритную эвтектику. Свободный графит в ней предсказуемо отсутствует. Металлическая матрица представлена ферритом. Твердость чугуна в литом состоянии находится в пределах 320-340 НВ.



а)



б)

Рис.1. Микроструктура чугуна ЧХЗ в исходном (литом) состоянии. Оптическое увеличение: а) $\times 200$; б) $\times 500$

Fig.1. Microstructure of ChKh3 cast iron in the initial (cast) state. Optical magnification: а) $\times 200$; б) $\times 500$

Термическую обработку образцов проводили в камерной термической печи типа СНОЛ, оборудованной ПИД-контроллером «Термодат 16-Е3». Температура нагрева под закалку составляла 890 °С, выдержка при этой температуре – 2 ч, после чего образцы извлекали из печи и подвергали остыванию на спокойном воздухе в соответствии с рекомендациями [17]. После остывания до температуры 40-50 °С, образцы подвергали отпуску при температуре 180-200 °С в течение 2 ч. Остывшие после отпуска образцы демонстрировали твердость 54-56 HRC. Полученные в результате закалки чугуна ЧХЗ микроструктуры представлены на рис.2. На рис.2а продемонстрированы также результаты измерения микротвердости основных фазовых составляющих – скелетной эвтектики и металлической матрицы. Как видно из представленных результатов, карбидный скелет ледобуритной эвтектики имеет твердость 57,7 HRC, тогда как твердость металлической

матрицы колеблется от 39,7 до 48,4 HRC. В литом состоянии твердость карбидного скелета составляла 57-58 HRC, тогда как твердость металлической матрицы – всего 22-24 HRC. Таким образом, повышение твердости материала в целом после термической обработки произошло в результате значительного повышения твердости металлической матрицы. Сравнивая между собой микроструктуру чугуна в литом и термообработанном состоянии (см. рис.1б и 2б, соответственно), можно сделать вывод, что существенное упрочнение металлической матрицы произошло в результате частичного растворения в ней карбидного скелета и последующей термофиксации твердого раствора при быстром охлаждении. Об этом свидетельствует характерный ореол вокруг карбидной фазы, а также округлые мелкодисперсные выделения карбидов в металлической матрице (темные точки на рис.2б).

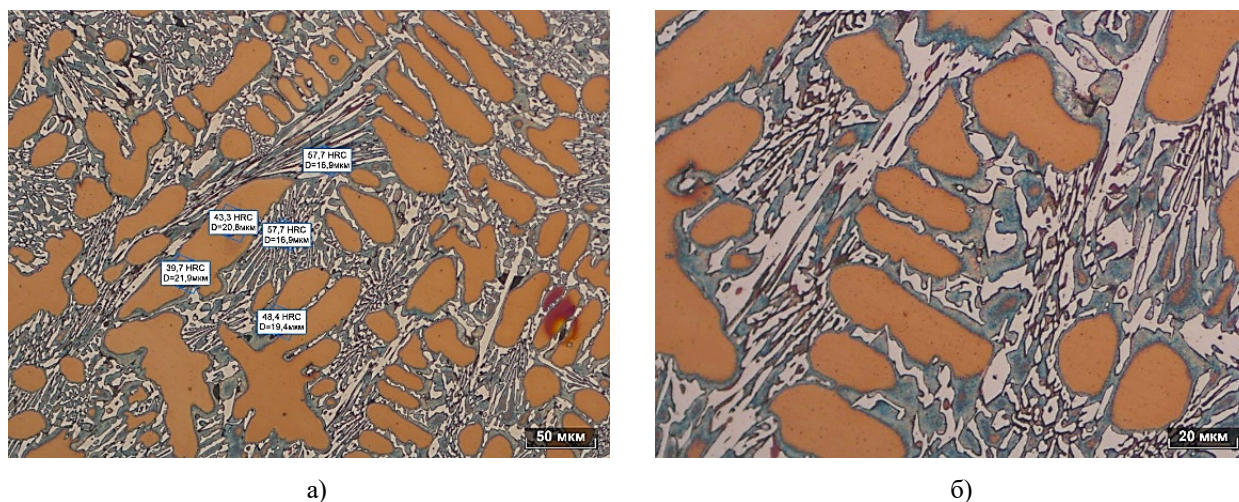


Рис.2. Распределение микротвердости (а) и микроструктура (б) чугуна ЧХЗ в термообработанном состоянии. Оптическое увеличение: а) $\times 200$; б) $\times 500$

Fig.2. Distribution of microhardness (a) and microstructure (b) of ChKh3 cast iron in the heat-treated state. Optical magnification: a) $\times 200$; b) $\times 500$

Заключение

Проведенные исследования показали, что при термической обработке основной вклад в повышение твердости износостойкого хромистого чугуна ЧХЗ вносит значительное повышение (в 2-2,5 раза) твердости металлической матрицы в результате твердорастворного упрочнения и частичного выделения мелкодисперсных включений в ней карбидных частиц.

Испытания термически обработанных лопаток дробеметной установки, изготовленных из чугуна ЧХЗ показали повышение ресурса работы в 8-11 раз по сравнению с литыми лопатками, не подвергнутыми термической обработке, и в 1,5-2 раза выше по сравнению с серийными лопатками дробеметной установки, изготовленными из чугуна 510Cr2, поставляемыми из КНР.

Список литературы

1. Гиршович Н.Г. Чугунное литьё. Л.-М. Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии. 1978. 708 с.
2. Филиппов М.А., Шарапова В.А., Швейкин В.П., Никифорова С.М., Плотников Г.Н., Эстемирова С.Х. Повышение износостойкости хромистых чугунов термической обработкой // Литейщик России. 2020. № 8. С. 35–40.
3. Богодухов С.И., Тавтилов И.Ш., Нгуен Х.Л. Термическая обработка износостойких чугунов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. №6. С. 71–77.
4. Харина Г.В., Шихалев И.А., Ведерников М.В. Исследование коррозионной стойкости хромированного чугуна // Проблемы современной науки и образования. 2015. № 9(39). С. 42–48.
5. Барановский А.Э., Ильюшенко В.М., Барановский Э.Ф., Короткин Г.П. Повышение ресурса работы деталей из износостойких хромистых чугунов // Литейное производство. 2011. № 2. С. 16–19.
6. Жумаев А.А., Барановский К.Э., Мансуров Ю.Н. Анализ микроструктуры износостойких хромистых чугунов после термической обработки // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 142–148.
7. Шерман, А.Д. Чугун: справ. изд. / А.Д. Шерман [и др.]; под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. Москва: Металлургия, 1991. 576 с.
8. Vander Voort G., Pakhomova O., Kazakov A., Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions // Materials Performance and Characterization. 2016. N 5. P. 521–534.
9. Kazakov A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative De-scription of Steel and Alloys Microstructure // Microsc. Microanal. 2015. 21 (Suppl 3). P. 457–458.
10. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Русакова А.В., Гурьев М.А., Старостенков М.Д. Микроструктура поверхности многокомпонентных диффузионных покрытий на основе бора // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10, № 1. С. 130–133.
11. 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 x12ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "Thixomet PRO" // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 165–168.
12. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Черных Е.В. Выявление фазового состава боридных покрытий методами цветного травления // Ползуновский альманах. 2020. № 3. С. 19–23.
13. 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.
14. Guriev A.M., Mei S.Q., Guriev M.A., Chernykh E.V., Ivanov S.G. Investigation of the microstructure of diffusion coatings of carbon steel obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium and titanium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012077.
15. Гурьев А.М., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов С.Г. Выявление особенностей морфологии и фазового состава сталей методами специального металлографического травления // В сб. тезисов XVI Международной школы-семинара «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах». 2020. С. 83–84.
16. 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.
17. ASM International 1991, ASM Handbook: Heat Treatment, Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio. 2173 p.

Информация об авторах

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий лабораторией микроскопии Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

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

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент Алтайского государственного технического огуниверситета им. И.И. Ползунова.

Д. А. Астахов – студент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Н. В. Мальков – студент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

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

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

References

- Girshovich, N .G. (1978). Chugunnoye lit'yo. L.-M. Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo literatury po chornoy i tsvetnoy metallurgii. P. 708.
- Filippov, M. A., Sharapova, V. A., Shveykin, V. P., Nikiforova, S. M., Plotnikov, G. N. & Estemirova S. Kh. (2020). Povysheniye iznosostoykosti khromistykh chugunov termicheskoy obrabotkoy. *Liteyshchik Rossii*, 8, 35–40.
- Bogodukhov, S. I., Tavtilov, I. Sh. & Nguen, Kh. L. (2017). Termicheskaya obrabotka iznosostoykikh chugunov. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 6, P. 71–77.
- Kharina, G. V., Shikhalev, I. A. & Vedernikov, M. V. (2015). Issledovaniye korrozionnoy stoykosti khromirovannogo chuguna. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 9(39), 42–48.
- Baranovskiy, A. E., Il'yushenko, V. M., Baranovskiy, E. F. & Korotkin, G. P. (2011). Povysheniye resursa raboty detaley iz iznosostoykikh khromistykh chugunov. *Liteynoye proizvodstvo*, 2, 16–19.
- Zhumayev, A. A., Baranovskiy, K. E. & Mansurov, Yu. N. (2021). Analiz mikrostruktury iznosostoykikh khromistykh chugunov posle termicheskoy obrabotki. *Lit'ye i metallurgiya*, 1, 142–148.
- Sherman, A. D. et al. (1991). Chugun: sprav. izd. Moskva: Metallurgiya. P. 576.
- Vander Voort, G., Pakhomova, O. & Kazakov, A., (2016). Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions. *Materials Performance and Characterization*, 5, 521–534.
- Kazakov, A. A. & Kiselev, D. V. (2015). Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys. *Microstructure. Microscopy and Microanalysis*, 3(21), 457–458.
- Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Rusakova, A. V., Gur'yev, M. A. & Starostenkov, M. D. (2013). Mikrostruktura poverkhnosti mnogokomponentnykh diffuzionnykh pokrytiy na osnove bora. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(10), 130–133. (In Russ.).
- 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 primeneniyem programmnoy kompleksa «Thixomet PRO». *Polzunovskiy vestnik*, 2, 165–168. (In Russ.).
- Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Kosheleva, E. A. & Chernykh, E. V. (2020). Vyyavleniye fazovogo sostava boridnykh pokrytiy metodami tsvetnogo travleniya. *Polzunovskiy al'manakh*, 3, 19–23. (In Russ.).
- 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 sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(17), 74–77. (In Russ.).
- Guriev, A. M., Mei, S. Q., Guriev, M. A., Chernykh, E. V. & Ivanov, S. G. (2019). Investigation of the microstructure of diffusion coatings of carbon steel obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium and titanium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012077.
- Gur'yev, A. M., Gur'yev, M. A., Zemlyakov, S. A. & Ivanov, S. G. (2020). Vyyavleniye osobennostey morfologii i fazovogo sostava staley metodami spetsial'nogo metallograficheskogo travleniya. V sb. tezisov XVI Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Evolyutsiya defektnykh struktur v kondensirovannykh sredakh», 83–84. (In Russ.).
- Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Zemlyakov, S. A., & Gur'yev, M. A. (2020). Metodika probopodgotovki obraztsov vysokolegированных staley dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy. *Polzunovskiy vestnik*, 3, 102–105. (In Russ.).
- (1991) ASM International 1991, ASM Handbook: Heat Treatment, Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio. P. 2173.

Information about the authors

S. G. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Associate Professor, Head of the Laboratory of Microscopy, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

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

M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

D. A. Astakhov – Student, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

N. V. Mal'kov – Student, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

V. V. Romanenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

E. V. Chernykh – Candidate of Physical and Mathematical 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 17.01.2023; одобрена после рецензирования 27.01.2023; принята к публикации 08.02.2023.

The article was received by the editorial board on 17 Jan. 23; approved after reviewing 27 Jan. 23; accepted for publication 08 Feb. 23.