

Научная статья

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

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.013

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ВЧ 50 С ЦЕЛЮ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО СТРУКТУРЫ

Сергей Геннадьевич Иванов¹, Михаил Алексеевич Гурьев²,
Вероника Викторовна Романенко^{3†}, Михаил Николаевич Зенин⁴,
Алексей Михайлович Гурьев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

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

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

¹ serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

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

³ veronika_65@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-2444-4848>

⁴ Mikhail.zenin.96@mail.ru

⁵ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Аннотация. В работе представлены результаты микроструктурного анализа высокопрочного чугуна ВЧ 50, полученного методом литья в холодно-твердеющие смеси. Для металлографического анализа взяты образцы лопатки дробеметной установки, в составе которых достаточно много цементита (от 8,00 до 14,36 об. %). При большом увеличении явно видна структура эвтектики, представляющая собой смесь цементита и перлита. Чугуны, в составе которых наряду с графитом присутствует цементит, имеют повышенную твердость, большую хрупкость, плохо обрабатываются резанием и могут применяться только после графитизирующего отжига, который исправляет этот литейный брак. Для улучшения структуры был проведен отжиг при температуре 700 °С, который позволил гомогенизировать структурно – фазовое состояние и понизить твердость материала примерно в 2 раза. Повторная термообработка позволила получить равновесную структуру с мартенситной матрицей, повысить пластичность и ударную вязкость материала образцов на 20-27 %.

Ключевые слова: термическая обработка, высокопрочные чугуны, графит, модификация, упрочнение, износостойкость, хрупкость, ударная вязкость, пластичность.

Благодарности: Металлографические исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ.

Для цитирования: Иванов С.Г., Гурьев М.А., Романенко В.В., Зенин М.Н., Гурьев А.М. Термическая обработка высокопрочного чугуна ВЧ 50 с целью улучшения его структуры // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 4. С. 519–526. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.013.

Original article

HEAT TREATMENT OF HIGH-STRENGTH CAST IRON VCh 50 TO IMPROVE ITS STRUCTURE

Sergey G. Ivanov¹, Mikhail A. Guryev², Veronika V. Romanenko^{3†}, Mikhail N. Zenin⁴,
Alexey M. Guryev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

^{1, 5} Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China

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

¹ serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

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

³ veronika_65@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-2444-4848>

⁴ Mikhail.zenin.96@mail.ru

⁵ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Abstract. The paper presents the results of a microstructural analysis of high-strength cast iron VCh 50, obtained by casting into cold-hardening mixtures. For metallographic analysis, samples of a shot blasting blade were taken, which contained quite a lot of cementite (from 8.00 to 14.36 vol. %). At high magnification, the eutectic structure is clearly visible, which is a mixture of cementite and pearlite. Cast irons, which contain cementite along with graphite, have increased hardness, greater fragility, are poorly processed by cutting and can only be used after graphitizing annealing, which corrects this casting defect. To improve the structure, annealing was carried out at a temperature of 700 °C, which made it possible to homogenize the structural-phase state and reduce the hardness of the material by approximately 2 times. Repeated heat treatment made it possible to obtain an equilibrium structure with a martensitic matrix and to increase the plasticity and impact strength of the sample material by 20-27 %.

Keywords: heat treatment, ductile cast irons, graphite, modification, hardening, wear resistance, brittleness, impact strength, plasticity.

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

For citation: Ivanov, S. G., Guryev, M. A., Romanenko, V. V., Zenin, M. N. & Guryev, A. M. (2024). Heat treatment of high-strength cast iron VCh 50 to improve its structure. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(4), 519–526. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.013.

Введение

В настоящее время, в машиностроении широко распространены железоуглеродистые сплавы (сталь и чугун), при этом более дешевым, но не менее надежным материалом считается чугун. Высокопрочный чугун получают путем добавления в расплав небольшого количества магния, способствующего образованию графита глобулярной формы. Такие чугуны имеют более высокие механические свойства, не уступающие литой углеродистой стали, сохраняя при этом хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость. Изменяя химический и фазовый состав чугунов, можно в широких пределах менять их свойства. Совершенствование состава, условий модифицирования с последующей термической обработкой (ТО) отливок позволяет получать высокопрочные чугуны с ферритной и ферритно-мартенситной матрицей. Такие материалы по критической температуре хрупкости и трещиностойкости при статическом и динамическом нагружении конкурируют как конструкционный материал с некоторыми сталями. Чугуны, в структуре которых наряду с графитом присутствует и ледебурит, имеют повышенную твердость, плохо обрабатываются резанием и могут применяться только после графитизирующего отжига, который исправляет этот литейный брак [1].

В настоящее время более 70-80 % заготовок составляют литые заготовки, так как технологии литейного производства являются основным и наиболее выгодным в экономическом плане способом их получения [2, 3]. В последнее время для получения наиболее качествен-

ных отливок используют метод литья в холодно-твердеющие смеси (ХТС). Литье в ХТС значительно улучшает качество необработанных поверхностей отливок по сравнению с другими технологиями литья в песчаные формы [4].

Целью данной работы является выбор метода термической обработки высокопрочных чугунов марки ВЧ 50 с целью улучшения их структуры.

Методика и материалы

Для металлографического анализа взяты образцы лопатки дробеметной установки, выполненные из высокопрочного чугуна ВЧ 50. Исследования проводились на отдельно отлитых заготовках, форма и размеры которых выполнены согласно ГОСТ 7293-85 (черт. 2).

Отливку образцов, представленных на анализ, получали методом литья в холодно-твердеющие смеси. Данные смеси не нуждаются в дополнительном нагреве в сушильных печах. Благодаря тому, что в составе смесей предусмотрены связующие компоненты и отвердители, они способны быстро затвердевать на воздухе. Технология литья чугуна в ХТС позволяет добиваться высокого качества поверхности отливки, исключить образование газовых дефектов или засоров. ХТС самые прочные из формовочных смесей, при этом они разрушаются от тепла кристаллизующегося металла, позволяя легко извлечь отливку из формы.

Для металлографического анализа использовались темплеты из механически обработанных литых заготовок диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Вырезку темплетов с края и с середины образца осуществляли на прецизионном отрезном станке «Microcut-201», затем осуще-

ствляли запрессовку темплетов в бакелитовый компаунд при помощи металлографического пресса «MetaPress». Шлифовку и полировку осуществляли на автоматическом шлифовально-полировальном станке «DigiPrep-P».

Металлографический анализ осуществляли при помощи металлографического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» и программного комплекса «ThixoMet PRO» по методикам [5-12].

Результаты и обсуждения

Микроструктура образца после травления реактивом Бераха представлена на рисунке 1. Образец имеет перлитную матрицу (58,07-66,53 об. % перлита). Детальный анализ фазового состава образцов представлен в таблице 1.

Графитовые включения в образце составляют 6,83-11,53 об. % и равномерно распределены по объему. Наибольшая доля включений графита приходится на диаметр от 0,83 до 46,4 мкм (край детали), от 0,83 до 66,5 мкм (середина детали). Причем графит имеет форму, далекую от глобулярной. Из таблицы 1 видно, что в составе чугуна достаточно много цемен-

тита (от 8,00 до 14,36 об. %). При большем увеличении явно видна структура эвтектики, представляющая собой смесь цементита и перлита (рис.2).

Чугуны, в составе которых наряду с графитом присутствует цементит, имеют повышенную твердость (НВ = 600-700 НВ), большую хрупкость, плохо обрабатываются резанием и могут применяться только после графитизирующего отжига, который исправляет этот литейный брак.

В работе для улучшения структуры чугуна ВЧ50 были использованы несколько режимов термической обработки. Стандартный отжиг при температуре 700 °С, с выдержкой при этой температуре и последующим медленным охлаждением вместе с печью до 400 °С, далее – на спокойном воздухе. Такой вид ТО позволил гомогенизировать структурно – фазовое состояние и понизить твердость материала примерно в 2 раза. На рисунке 3 представлена микроструктура образца после ТО. Как видно из рисунка, количество графитовых включений незначительно увеличилось, но степень глобулярности далека от совершенства.

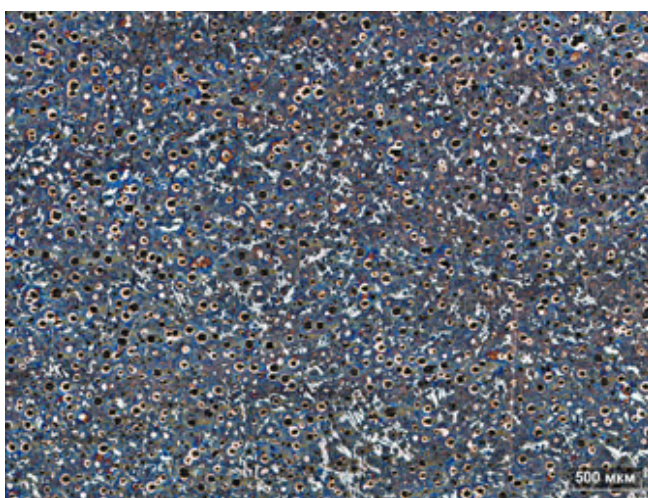


Рис.1. Микроструктура образца для оценки фазового состава, ×50

Fig.1. Microstructure of the sample for phase composition assessment, ×50

Таблица 1. Фазовый состав образца лопатки дробеметной установки

Table 1. Phase composition of a shot blasting machine blade sample

Фаза	Объем, %	
	образец вырезан в середине детали	образец вырезан с краю детали
Перлит	58,07	66,53
Феррит	22,39	12,28
Цементит	8,00	14,36
Графит	11,53	6,83

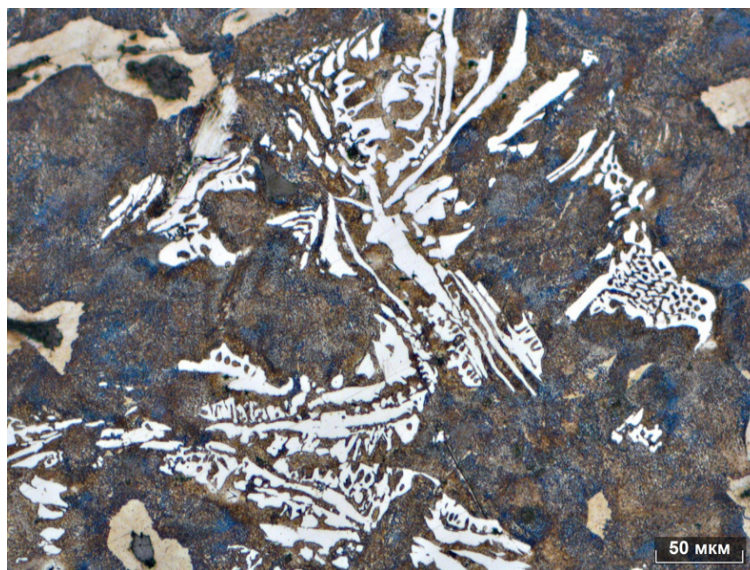


Рис.2. Микроструктура образца с включениями цементита, $\times 200$

Fig.2. Microstructure of a sample with cementite inclusions, $\times 200$

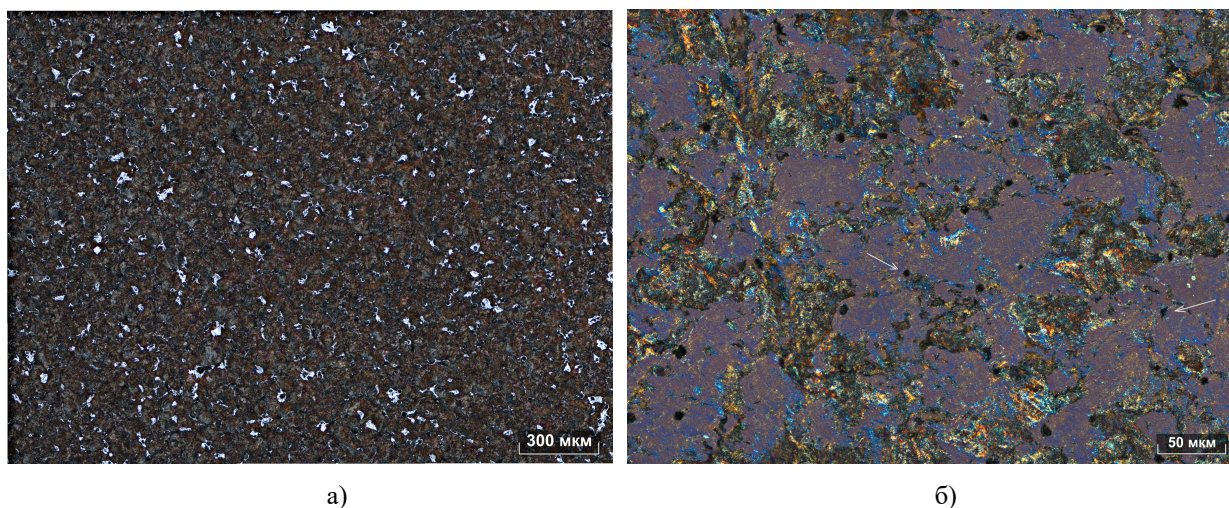


Рис.3. Микроструктура образца после ТО, а – без поляризации, $\times 100$;
б – микроструктура в поляризованном свете, $\times 500$. Стрелками показаны включения графита

Fig.3. Microstructure of the sample after heat treatment (HT), а – without polarization, $\times 100$;
b – microstructure in polarized light, $\times 500$. Arrows indicate graphite inclusions

При большем увеличении видно, что произошло растворение цементита и преобразование его в феррит и графит.

Повторная термическая обработка образцов была проведена по двум режимам.

Режим № 1. Нормализация. Нагрев до температуры $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$, выдержка 1 час, далее – охлаждение на спокойном воздухе до комнатной температуры, затем отпуск $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов, охлаждение на спокойном воздухе. В результате ТО сформи-

ровался в большом количестве равновесный графит шаровидной формы, вокруг которого наблюдается ферритная оторочка (рис.4). Цементит, входящий в состав исходной структуры, практически полностью растворился. Данный режим ТО привел к значительному улучшению структуры материала, ее гомогенизации. В результате нормализации увеличилась твердость и прочность образцов, а отпуск способствовал повышению пластичности образовавшейся аустенитной матрицы.

Режим № 2. Закалка. Нагрев до температуры 950 °С, выдержка 30 минут, закалка, затем отпуск при 210 °С в течение 2 часов, охлаждение на спокойном воздухе. На рис.5а представлена микроструктура полированного образца до его травления. Наблюдается равномерное распределение графита в матрице образца. «Лучистая» структура глобул графита позволяет сделать вывод о том, что они были образованы в процессе термообработки. Для определе-

ния состава матрицы образцы были обработаны пикриновой кислотой. В результате закалки образовался мартенсит и остаточный аустенит в количестве 10-15 %. На рис.5б можно наблюдать «иглы» мартенсита отпуска. Данный вид ТО позволил повысить твердость материала в 2-2,25 раза по сравнению с твердостью образцов после отжига (рис.6), получить равновесную структуру, повысить пластичность материала образцов на 20-27 %.

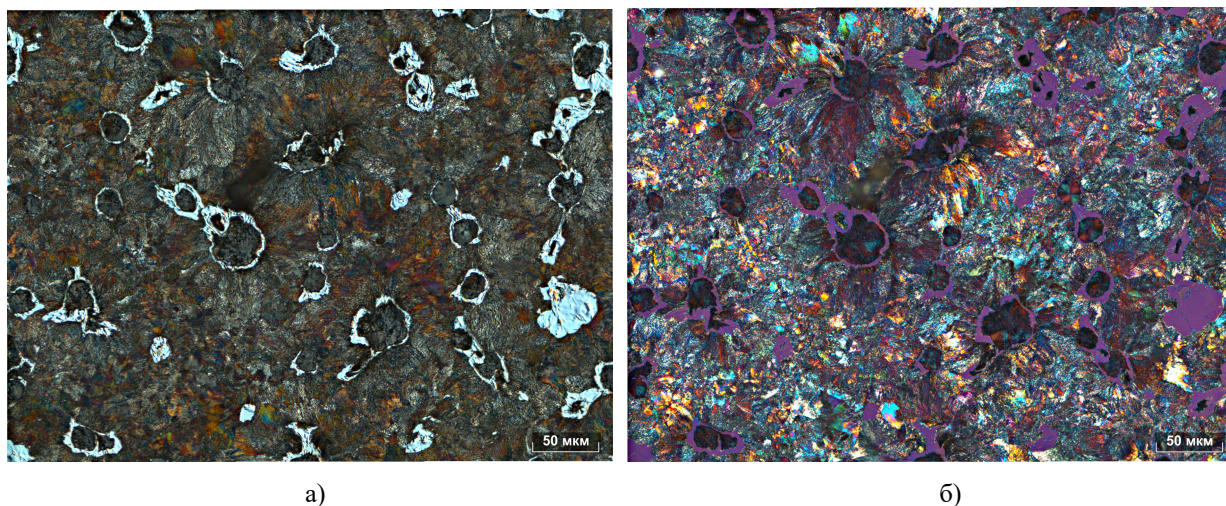


Рис.4. Образец после ТО по режиму № 1: а – без поляризации; б – микроструктура в поляризованном свете, ×500

Fig.4. Sample after HT according to mode No. 1: а – without polarization; б – microstructure in polarized light, ×500

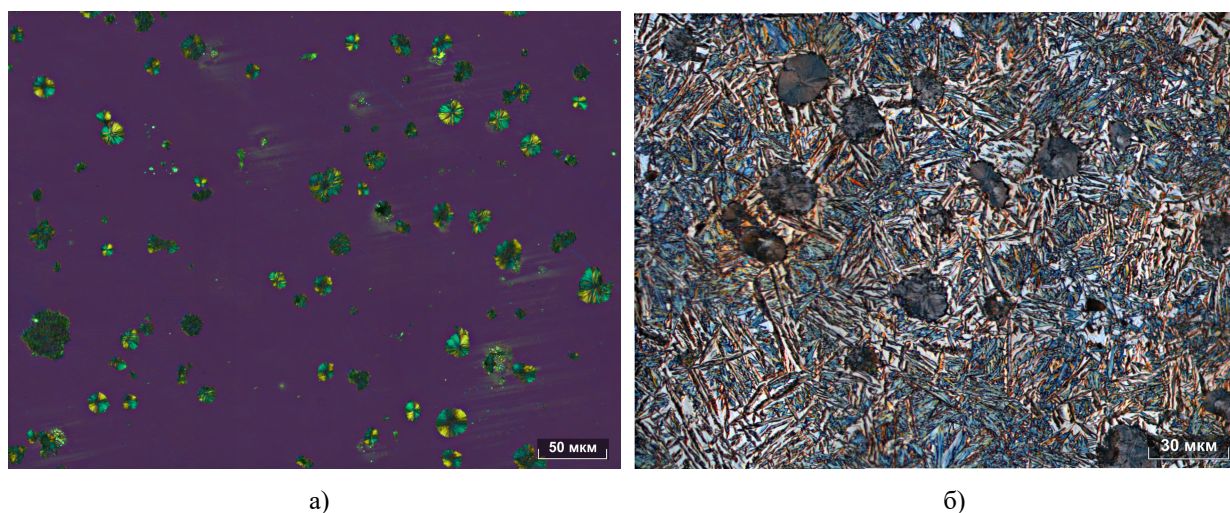


Рис.5. Образец после ТО по режиму № 2: а – в поляризованном свете до травления образца, ×500; б – после травления, ×1000

Fig.5. Sample after HT according to mode No. 2: а – in polarized light before etching the sample, ×500; б – after etching, ×1000

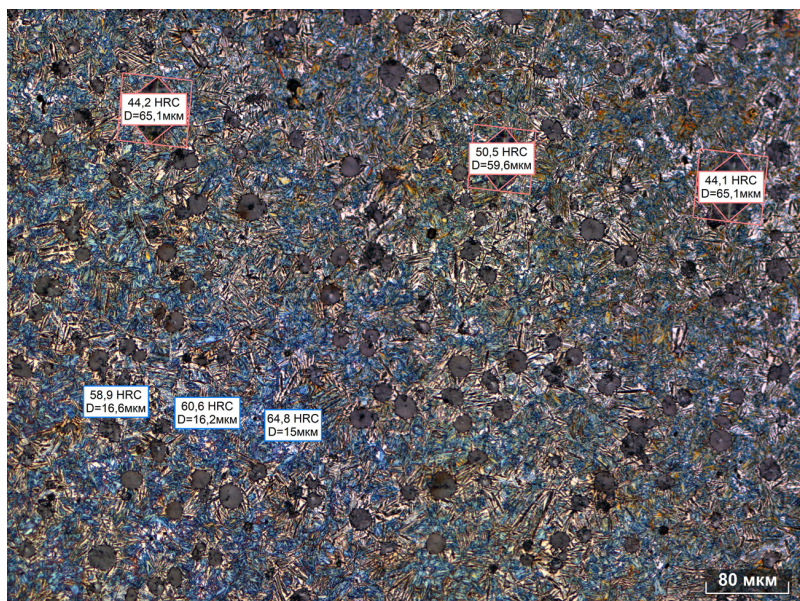


Рис.6. Твердость образца после закалки, $\times 200$

Fig.6. Hardness of the sample after quenching, $\times 200$

Заключение

Проведенные исследования показали, что отжиг образцов со структурой эвтектики при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволил снизить твердость примерно в 2 раза, произошло растворение цементита и преобразование его в феррит и графит. Повторная термообработка позволила получить равновесную структуру с мартенситной матрицей, повысить пластичность и ударную вязкость материала образцов на 20-27 %.

Список литературы

1. Двоглазов Г.А. *Материаловедение: учебник для вузов*. Ростов-на-Дону.: Феникс, 2015. 445 с.
2. Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Деев В.Б. Технология упрочнения стальных изделий в процессе литья // *Литейщик России*. 2013. № 6. С. 36–38.
3. Гиршович Н.Г. *Чугунное литьё*. Л.-М. Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1978. 708 с.
4. Мельников А.П., Кукуй Д.М. Современные тенденции развития технологии в литейном производстве // *Литьё и металлургия*. 2008. Т. 47, № 3. С. 65–80.
5. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Гурьев М.А. Морфология и фазовый состав диффузионного боридного слоя на основе

металлографического анализа стали 45 // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023. Т. 43, № 1. С. 59–65.

6. Гурьев М.А., Гурьев А.М., Иванов С.Г., Аугсткалн А.И. Поверхностное легирование чугунных отливок // *Литейное производство*. 2021. № 7. С. 6–8.

7. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Кошелева Е.А., Гурьев А.М. Проблема инструментальных исследований элементарного состава тонких диффузионных покрытий на железоуглеродных сплавах // *Ползуновский альманах*. 2021. № 3. С. 3–6.

8. Гурьев М.А., Иванов А.Г., Иванов С.Г., Гурьев А.М. Упрочнение литых сталей поверхностным легированием из борсодержащих обмазок // *Успехи современного естествознания*. 2010. № 3. С. 123.

9. 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.

10. Гурьев М.А., Аугсткалн А.И., Гурьев А.М., Иванов С.Г. Структура и свойства многокомпонентных диффузионных покрытий на сером чугуне СЧ 25 // *Фундаментальные пробле-*

мы современного материаловедения. 2020. Т. 17, № 1. С. 26–31.

11. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Земляков С.А., Гурьев А.М. Износостойкий высокохромистый чугун, легированный медью // Ползуновский альманах. 2019. № 3. С. 136–138.

12. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Марков А.М., Гурьев М.А., Габец А.В. и др. Исследование микроструктуры диффузионных покрытий на чугуне ЧМН-35М, полученных химико-термической обработкой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13, № 4. С. 497–500.

Информация об авторах

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий лабораторией микроскопии, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет.

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

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

М. Н. Зенин – аспирант, инженер, младший научный сотрудник 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.

References

1. Dvoyeglazov, G. A. (2015). *Materialovedeniye: uchebnik dlya vuzov*. Rostov-na-Donu.: Feniks. P. 445. (In Russ.).

2. Gur'yev, M. A., Fil'chakov, D. S., Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M. & Deyev, V. B. (2013). Tekhnologiya uprochneniya stal'nykh izdeliy v protsesse lit'ya. *Liteyshchik Rossii*, (6), 36–38. (In Russ.).

3. Girshovich, N. G. (1978). *Chugunnoye lit'yo*. L.-M. Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo literatury po chornoy i tsvetnoy metallurgii. P. 708. (In Russ.).

4. Mel'nikov, A. P. & Kukuy, D. M. (2008). Sovremennyye tendentsii razvitiya tekhnologii v liteynom proizvodstve. *Lit'yo i metallurgiya*, 47(3), 65–80. (In Russ.).

5. 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.).

6. Gur'yev, M. A., Gur'yev, A. M., Ivanov, S. G. & Augstkaln, A. I. (2021). Poverkhnostnoye legirovaniye chugunnykh otlivok. *Liteynoye proizvodstvo*, (7), 6–8. (In Russ.).

7. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Kosheleva, E. A. & Gur'yev, A. M. (2021). Problema instrumental'nykh issledovaniy elementarnogo sostava tonkikh diffuzionnykh pokrytiy na zhelezouglerodnykh splavakh. *Polzunovskiy al'manakh*, (3), 3–6. (In Russ.).

8. Gur'yev, M. A., Ivanov, A. G., Ivanov, S. G. & Gur'yev, A. M. (2010). Uprochneniye litykh staley poverkhnostnym legirovaniyem iz borsoderzhashchikh obmazok. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, (3), 123. (In Russ.).

9. 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 programmogo kompleksa «ThixoMet PRO». *Polzunovskiy vestnik*, (2), 165–168. (In Russ.).

10. Gur'yev, M. A., Augstkaln, A. I., Gur'yev, A. M. & Ivanov, S. G. (2020). Struktura i svoystva mnogokomponentnykh diffuzionnykh pokrytiy na serom chugune SCH 25. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(1), 26–31. (In Russ.).

11. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Zemlyakov, S. A. & Gur'yev, A. M. (2019). Iznosostoykiy vysokokhromisty chugun, legirovanny med'yu. *Polzunovskiy al'manakh*, (3), 136–138. (In Russ.).

12. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Markov, A. M., Gur'yev, M. A. & Gabets A.V. et al. (2016). Issledovaniye mikrostruktury diffuzionnykh pokrytiy na chugune CHMN-35M, poluchennykh

khimiko-termicheskoy obrabotkoy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 13(4), 497–500. (In Russ.).

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, Wuhan Textile 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.

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

M. N. Zenin – Graduate Student, Engineer, Junior Researcher, 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.

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

Статья поступила в редакцию 03.09.2024; одобрена после рецензирования 14.10.2024; принята к публикации 02.12.2024.

The article was received by the editorial board on 03 Sept. 2024; approved after reviewing 14 Oct. 2024; accepted for publication 02 Dec. 2024.