

Научная статья

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

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.014

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ВЧ 50****Михаил Алексеевич Гурьев^{1†}, Сергей Геннадьевич Иванов²,
Вероника Викторовна Романенко³, Артур Игоревич Аугсткалн⁴,
Михаил Николаевич Зенин⁵, Евгения Владимировна Черных⁶, Алексей Михайлович Гурьев⁷**^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия^{1, 2, 7} Уханьский текстильный университет, ул. ФангЖи, 1, 430073, Ухань, КНР¹ Чжэцзян Бриллиант Холодильное Оборудование Ко., ООО, Руао Промышленный парк, Синчан, провинция Чжэцзян, 312500, КНР¹ gurievma@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>² serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>³ veronika_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2444-4848>⁴ augstkaln-a@yandex.ru⁵ mikhail.zenin.96@mail.ru⁶ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>⁷ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Аннотация. В работе представлены результаты микроструктурного анализа высокопрочного чугуна ВЧ 50. Степень глобулярности включений графита определяли через фактор формы F2, который в свою очередь определяется как отношение диаметров вписанной в частицу окружности к диаметру окружности, описанной вокруг частицы: чем ближе данное отношение к 1, тем выше степень глобулярности. Из данных о факторе формы F2 включений графита следует, что только 32,7 об. % графитных включений имеют близкую к глобулярной форму. Это свидетельствует о нарушении технологии модификации чугуна и получении в образце немодифицированного графита. Проведенные исследования также показали, что представленный на исследование образец чугуна не проходил термической обработки, либо, в случае проведения термической обработки, она проводилась с неправильными параметрами: вероятнее всего температура термической обработки была меньше рекомендованной температуры (700 °С). Нарушение технологии модификации и дальнейшей термической обработки отливки приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик чугуна. Проведение повторной термической обработки по правильному режиму позволило улучшить микроструктуру и нивелировать эти недостатки. После повторной термической обработки в виде отжига при температуре 700 °С в течение 4 часов с последующим охлаждением до 400 °С вместе с печью, далее – на воздухе, позволило увеличить долю сфероидизированных частиц графита с 32,7 до 65 об. %. Отжиг проводили с целью повышения прочностных свойств материала, а также пластичности и ударной вязкости.

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: Гурьев М.А., Иванов С.Г., Романенко В.В., Аугсткалн А.И., Зенин М.Н., Черных Е.В., Гурьев А.М. Влияние термической обработки на физико-механические свойства высокопрочного чугуна ВЧ 50 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2024. Т. 21, № 1. С. 122–130. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.014.

Original article

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CAST IRON VCh 50

Mikhail A. Guryev^{1†}, Sergey G. Ivanov², Veronika V. Romanenko³, Artur I. Augstkaln⁴,
Mikhail N. Zenin⁵, Evgeniya V. Chernykh⁶, Alexey M. Guryev⁷

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

^{1, 2, 7} Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China

¹ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd., Ruao Industry Park, Xingchang, Zhejiang Province, 312500, China

¹ guriyeva@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

² serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

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

⁴ augstkaln-a@yandex.ru

⁵ mikhail.zenin.96@mail.ru

⁶ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

⁷ guriyam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Abstract. The paper presents the results of microstructural analysis of high-strength cast iron VCh 50. The degree of globularity of graphite inclusions was determined through the shape factor F2, which in turn is defined as the ratio of the diameters of the circle inscribed in the particle to the diameter of the circle described around the particle: the closer this ratio is to 1, the higher degree of globularity. From the data on the shape factor F2 of graphite inclusions it follows that only 32.7 vol. % of graphite inclusions have a close to globular shape. This indicates a violation of the cast iron modification technology and the production of unmodified graphite in the sample. The studies also showed that the cast iron sample submitted for research did not undergo heat treatment, or, in the case of heat treatment, it was carried out with incorrect parameters: most likely the heat treatment temperature was lower than the recommended temperature (700 °C). Violation of the technology of modification and further heat treatment of the casting leads to a deterioration in the performance characteristics of cast iron. Carrying out repeated heat treatment according to the correct regime made it possible to improve the microstructure and level out these shortcomings. After repeated heat treatment in the form of annealing at a temperature of 700 °C for 4 hours, followed by cooling to 400 °C together with the furnace, then in air, it was possible to increase the proportion of spheroidized graphite particles from 32.7 to 65 vol. %. Annealing was carried out to increase the strength properties of the material, as well as ductility and toughness.

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

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

For citation: Guryev, M. A., Ivanov, S. G., Romanenko, V. V., Augstkaln, A. I., Zenin, M. N., Chernykh, E. V. & Guryev, A. M. (2024). Influence of heat treatment on physical-mechanical properties of high strength cast iron VCh 50. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(1), 122–130. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.014.

Введение

В отечественной промышленности большое количество деталей для нужд машиностроения и других отраслей промышленности изготавливается из различных видов чугуна. Ранее считалось, что серьезным недостатком чугуна является его хрупкость и неудовлетворительная прочность при растяжении. Но в настоящее время чугуны – это материалы с высокими показателями устойчивости к ударным нагрузкам, термической стойкостью и износостойкостью. Физико-механические и эксплуатационные свойства высокопрочных чугунов различных марок сравнимы со свойствами кон-

струкционных сталей, а по некоторым показателям даже значительно их превосходят [1].

Работая в экстремальных условиях, конструкционные детали неизбежно подвергаются циклическим механическим нагрузкам, негативным воздействиям температуры, давления, окружающей среды. Поэтому изучение структурных изменений в процессе эксплуатации, разработка методик по улучшению эксплуатационных свойств чугунов представляется актуальной задачей [2].

В настоящее время около половины заготовок и деталей машин составляют литые заготовки, так как технологии литейного производ-

ства являются основным и одним из наиболее целесообразных в экономическом плане способом их получения. На долю чугунных отливок приходится более 70% [3, 4] производства заготовок деталей. Для улучшения физико-механических свойств в дальнейшем отливки подвергают термической обработке – отжигу, нормализации, либо закалке с последующим отпусканием [5]. Структуру и свойства чугуна в процессе и после окончания термообработки определяют на основе металлографического анализа.

Целью данной работы является исследование влияния термической обработки на эволюцию структуры и физико-механических свойств высокопрочных чугунов марки ВЧ 50. Чугун ВЧ-50 обладает высокой прочностью на разрыв, хорошей износостойкостью и отличными механическими свойствами, что позволяет ис-

пользовать его в производстве блоков цилиндров, коленчатых и распределительных валов для двигателей внутреннего сгорания, для изготовления компонентов гидравлических и пневматических агрегатов, труб и фитингов.

Методика и материалы

В работе проведен металлографический анализ образца, выполненного из высокопрочного чугуна ВЧ 50 с шаровидной формой графита. Исследования проводились на отдельно отлитых заготовках, форма и размеры которых выполнены согласно ГОСТ 7293-85 (черт.2). Химический состав и механические свойства чугуна ВЧ 50 определялись на этих же образцах по выше указанному стандарту и представлены в таблицах 1, 2 [6].

Таблица 1. Химический состав чугуна ВЧ 50

Table 1. Chemical composition of cast iron VCh 50

Элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr
Содержание элементов, %	2,7-3,7	0,8-2,9	0,3-0,7	до 0,02	до 0,1	до 0,15

Таблица 2. Механические свойства чугуна ВЧ 50 при 20 °С

Table 2. Mechanical properties of cast iron VCh 50 at 20 °С

Предел кратковременной прочности, МПа	Предел текучести для остаточной деформации, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость
500	320	7	НВ 10 ⁻¹ = 153-245 МПа

Отливку образцов, представленных на анализ, получали методом литья в одноразовые песчано-глинистые формы. Для изготовления рабочей полости формы использовались неразъемные пластиковые модели, закрепленные на модельные плиты совместно с элементами литниково-питающей системы. Форма выполнена из двух полуформ ручной формовкой. Рабочая полость и литниковые каналы обрабатывались противопригарным покрытием на спиртовой основе Циркофлюид 1219Б (ТУ 2312-874-55778270-2009). Скрепление формы осуществлялось скобами и установкой дополнительных грузов непосредственно перед ее заполнением.

Выплавка чугуна осуществлялась в индукционной печи KGPS-350-0,5 (Китай) с набивным тиглем емкостью 500 кг. В качестве футе-

ровочного материала применялась сухая кислая набивная масса FINMIX 0,8 на основе диоксида кремния. Экспресс-анализ для определения, контроля и корректировки химического состава сплава осуществлялся на эмиссионном спектрометре «АРГОН – 5СФ». Шихтовые материалы подбирались таким образом, чтобы исключить избыточное содержание серы (не более 0,02 % масс.) и наличия других демодифицирующих элементов. Расплав чугуна обрабатывался комплексным модификатором ФСМг6, при этом модификатор подавался на струю жидкого металла в момент выпуска из печи. Контроль температуры заливки осуществлялся переносным прибором ТЦП – 1800П при помощи сменного термоэлектрического преобразователя с НСХ типа В (ПР30 /ПР6) как в печи во время приготовления, так и в ковше перед

заливкой форм. Заливка форм производилась при температуре 1390-1450 °С. После затвердевания отливок их выбивали и осуществляли охлаждение на воздухе. После остывания отливки очищали от формочной смеси на дробеметной установке.

Для металлографического анализа использовались темплеты из механически обработанных литых заготовок диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Вырезку темплетов осуществляли на прецизионном отрезном станке «Microcut-201», затем осуществляли запрессовку темплетов в бакелитовый компаунд при помощи металлографического пресса «MetaPress». Шлифовку и полировку осуществляли на автоматическом шлифовально-полировальном станке «DigiPrep-R».

Металлографический анализ осуществляли при помощи металлографического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» и программного комплекса «ThixoMet PRO» по методикам [9-16].

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 представлена микроструктура полированного образца до его травления. Как видно из рисунка, графит в представленном образце неравномерно распределен по объему металлической матрицы, что приводит к анизотропии свойств чугуна и снижает его эксплуатационные характеристики.

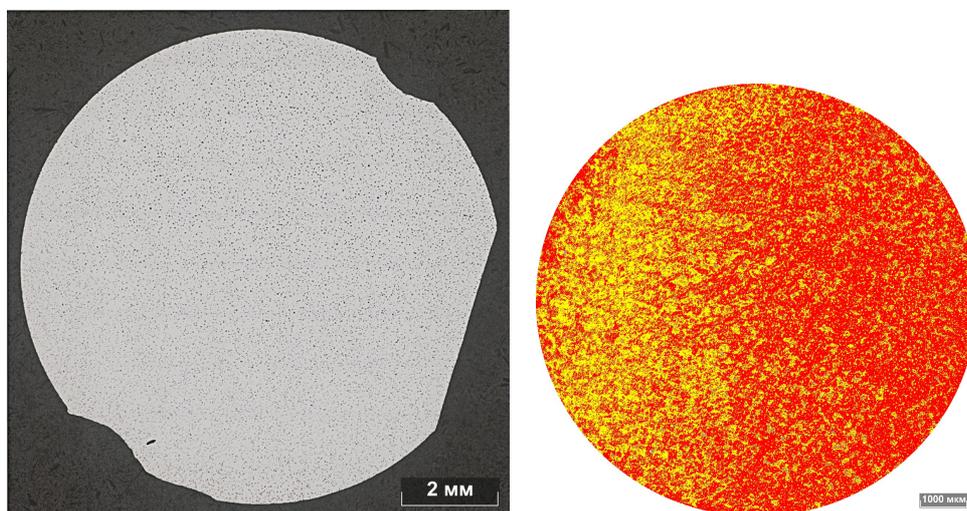


Рис.1. Микроструктура полированного образца для оценки формы графита, $\times 50$

Fig.1. Microstructure of a polished sample for evaluating the shape of graphite, $\times 50$

Формы включений графита – шаровидная (ШГф4), средний диаметр включений равен 29,4 мкм, и вермикулярная (ВГф1), средний размер включений – 44,2 мкм. Объемная доля включений графита составляет 3 % об. Графитные включения в соответствии с ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры» распределены следующим образом: ВГф1(1,58 %) – ВГф2(1,96 %) – ВГф3(35,5 %) – ШГф1(0,004 %; д15) – ШГф3(5,33 %; д45) – ШГф4(34,7 %; д45) – ШГф5(20,9 %; д45). Подробное распределение включений графита по размерам и форме представлено в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, наибольшая доля включений графита шаровидной формы приходится на диаметр от 19,7 до 29,4 мкм – 46,7 %

включений, 38 об. % включений имеют диаметр в диапазоне от 10 до 19,7 мкм. На включения графита вермикулярной формы наибольшая доля приходится на диаметр от 10,2 до 27,2 мкм – 51,2 % включений. Соотношение включений графита шаровидной формы и включений вермикулярного графита – 13:1. Степень глобулярности включений графита определяли через фактор формы F2, который в свою очередь определяется как отношение диаметров вписанной в частицу окружности к диаметру окружности, описанной вокруг частицы: чем ближе данное отношение к 1, тем выше степень глобулярности. Из данных о факторе формы F2 включений графита следует, что только 32,7 об. % графитных включений имеют близкую к глобулярной форму. Это свидетель-

ствует о нарушении технологии модификации чугуна и получении в образце немодифицированного графита. На рисунке 2 представлена микроструктура образца, на которой наблюдается включения графита неправильной морфологии. Такие включения являются центрами

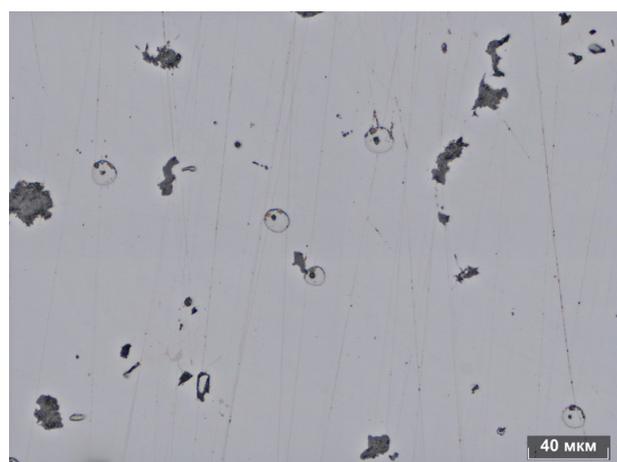
концентрации напряжений, что может приводить к образованию трещин. Это, в свою очередь, влияет на прочностные свойства чугуна, и прежде всего на его пластические свойства и ударную вязкость.

Таблица 3. Результаты исследования распределения графитных включений по размерам и степени глобулярности

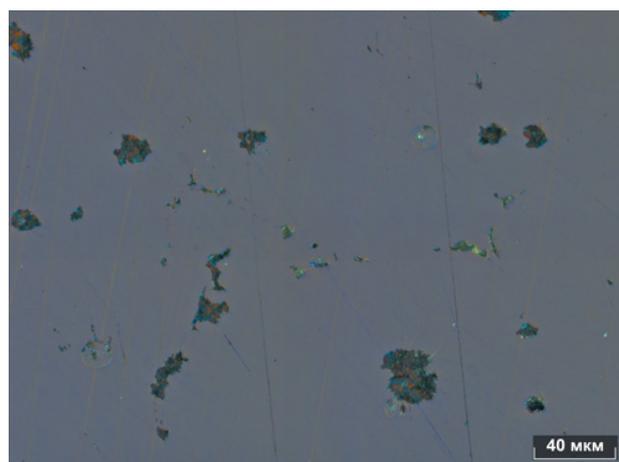
Table 3. The results of the study of the distribution of graphite inclusions by size and degree of globularity

Объемное распределение графитных включений по диаметрам, мкм				
Вермикулярный графит				
№	от	до	Объем, %	Количество, шт/мм ³
1	10,2	27,2	51,2	211
2	27,2	44,2	36,2	34
3	44,2	61,2	5,55	3
4	61,2	78,2	7,01	2
Количество объектов				249
Среднее				29,8
Объемное распределение графитных включений по диаметрам, мкм				
Шаровидный графит				
№	от	до	Объем, %	Количество, шт/мм ³
1	10	19,7	38	2437
2	19,7	29,4	46,7	1151
3	29,4	39,1	13,5	172
4	39,1	48,8	1,85	14
Количество объектов				3771
Среднее				22,3

Объемное распределение графитных включений по фактору формы F2				
Вермикулярный графит				
№	от	до	Объем, %	Количество, шт/мм ³
1	0,17	0,25	5,04	10
2	0,25	0,33	30,3	61
3	0,33	0,42	38	103
4	0,42	0,5	26,7	76
Количество объектов				249
Среднее				0,37
Объемное распределение графитных включений по фактору формы F2				
Шаровидный графит				
№	от	до	Объем, %	Количество, шт/мм ³
1	0,5	0,59	28,4	1355
2	0,59	0,67	38,9	1470
3	0,67	0,76	27,2	817
4	0,76	0,84	5,5	131
Количество объектов				3771
Среднее				0,63



а)



б)

Рис.2. Микроструктура полированного образца, $\times 500$: а) в естественном свете, б) в поляризованном свете

Fig.2. Microstructure of a polished sample, $\times 500$: a) without polarization, b) microstructure in polarized light

Определение структурно-фазового состояния матрицы проводилось на травленном образце (рис.3) [17, 18]. Травление осуществлялось реактивом Бераха [19, 20]. Как видно из рисунка, металлическая матрица чугуна практически полностью состоит из феррита, на долю которого приходится 60,97 об. %. 39,03 об. % составляют графит и перлит, включения которого различимы в поляризованном свете (рис.3б).

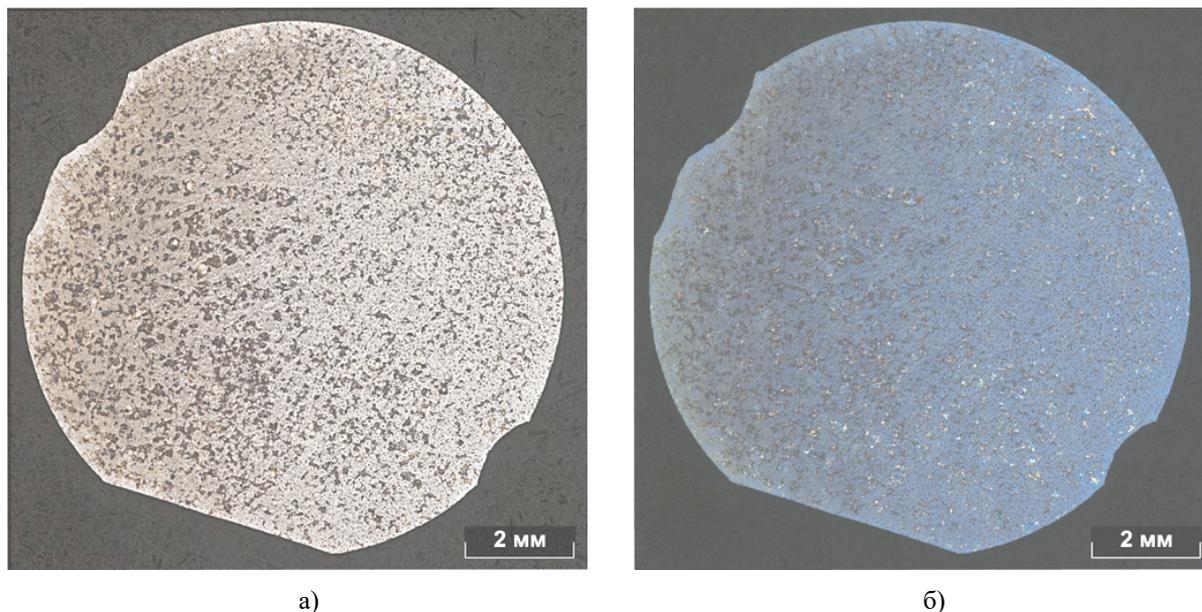


Рис.3. Образец после травления для оценки фазового состава, $\times 50$: а) в естественном свете, б) в поляризованном свете

Fig.3. The sample after etching to evaluate the phase composition, $\times 50$: a) without polarization, b) microstructure in polarized light

Для гомогенизации структуры высокопрочные чугуны подвергают отжигу при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой при этой температуре и последующим медленным охлаждением вместе с печью до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, далее – на воздухе. Такой вид термической обработки позволяет сформировать дополнительное количество глобулярных включений графита, а также повысить степень совершенности структуры.

Заключение

Проведенные исследования показали, что представленный на исследование образец чугуна не проходил термической обработки, либо, в случае проведения термической обработки, она проводилась с неправильными параметрами: вероятнее всего температура термической обработки была меньше рекомендованной температуры ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$). Об этом свидетельствует

Перлит в виде мелких включений в основной фазе повышает прочность сплава, при этом не вызывая резкого снижения пластичности. Ферритные чугуны обладают высокой пластичностью, но нарушение режима модификации приводит к снижению прочностных свойств и неравномерному распределению напряжений в чугуне.

структура графитных включений в чугуне, изображение которой получено в поляризованном свете (рис.2б).

Список литературы

1. Щербединский Г.В. Чугун как перспективный материал XXI столетия // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. №7. С. 83–93.
2. Андреев В.В. Особенности формирования литой структуры высокопрочных чугунов и разработка эффективных технологий изготовления отливок с высокими параметрами эксплуатационных свойств: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2012. 79 с.
3. Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Деев В.Б. Технологияупрочнения стальных изделий в процессе литья // *Литейщик России*. 2013. № 6. С. 36–38.

4. Гиршович Н.Г. Чугунное литьё. Л.-М. Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1978. 708 с.
5. Бокштейн Б.С. и др. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна / справочник: в 3 т. М.: Интернет Инжиниринг, 2004. 24 с.
6. Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс] / Официальный сайт http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1500 Дата обращения 08. 01.2024.
7. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Алонцева Д.Л., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. Взаимосвязь химического состава насыщающей среды и диффузионного покрытия на сталях 45 и 45Л // Письма о материалах. 2014. Т. 4, № 3(15). С. 179–181.
8. Аугсткалн А.И., Гурьев М.А., Иванов С.Г. Влияние термообработки на ликвацию углерода в отливках, полученных литьем по газифицируемым моделям // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 74–79.
9. 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 индустриального университета. 2023. № 1 (43). С. 59–65.
10. Гурьев М.А., Гурьев А.М., Иванов С.Г., Аугсткалн А.И. Поверхностное легирование чугуновых отливок // Литейное производство. 2021. № 7. С. 6–8.
11. 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.
12. 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.
13. 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 X12F1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "Thixomet PRO" // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 165–168.
14. Гурьев М.А., Аугсткалн А.И., Гурьев А.М., Иванов С.Г. Структура и свойства многокомпонентных диффузионных покрытий на сером чугуне СЧ 25 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17, № 1. С. 26–31.
15. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Земляков С.А., Гурьев А.М. Износостойкий высокохромистый чугун, легированный медью // Ползуновский альманах. 2019. № 3. С. 136–138.
16. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Марков А.М., Гурьев М.А., Габец А.В., Габец Д.А. Исследование микроструктуры диффузионных покрытий на чугуне ЧМН-35М, полученных химико-термической обработкой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13. № 4. С. 497–500.
17. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Кошелева Е.А., Логинова М.В., Гурьев А.М. Исследование структуры литого композиционного материала на основе высокопрочного чугуна // Ползуновский альманах. 2015. № 2. С. 87–90.
18. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Гурьев М.А., Мальков Н.В., Астахов Д.А., Романенко В.В., Черных Е.В. Исследование влияния термической обработки на структуру и свойства высокопрочного чугуна марки ВЧ 35 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20. № 1. С. 123–131.
19. 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 низколегируемого износостойкого чугуна ЧХЗ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20. № 1. С. 92–98.
20. 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.

Информация об авторах

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет,

Чжэцзян Бриллиант Холодильное Оборудование Ко., ООО.

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

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

А. И. Аугсткалн – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

М. Н. Зенин – аспирант, инженер, младший научный сотрудник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Е. В. Черных – кандидат физико-математических наук, доцент 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. Shcherbedinsky, G. V. (2005). Cast iron as a promising material of the 21st century. *Metal science and heat treatment of metals*, (7), 83–93. (In Russ.).
2. Andreyev, V. V. (2012). Osobennosti formirovaniya litoy struktury vysokoprochnykh chugunov i razrabotka effektivnykh tekhnologiy izgotovleniya otlivok s vysokimi parametrami ekspluatatsionnykh svoystv: dis. ... dokt. tekhn. nauk. Moskva. P. 79. (In Russ.).
3. Guryev, M. A., Filchakov, D. S., Ivanov, S. G., Guryev, A. M. & Deev, V. B. (2013). Technology of strengthening steel products in the casting process. *Foundry worker of Russia*, (6), 36–38. (In Russ.).
4. Girshovich, N. G. (1978). Cast iron. L.-M. State scientific and technical publishing house of literature on ferrous and non-ferrous metallurgy. P. 708. (In Russ.).
5. Bokstein, B. S. et al. (2004). Metal science and heat treatment of steel and cast iron / reference book: in 3 volumes. M.: Internet Engineering. P. 24. (In Russ.).
6. Marochnik stali i splavov [Elektronnyy resurs] / Ofitsial'nyy sayt http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1500 Data obrashcheniya 08. 01.2024. (In Russ.).
7. Guryev, M. A., Ivanov, S. G., Alontseva, D. L., Ivanova, T. G. & Guryev, A. M. (2014). The relationship between the chemical composition of the saturating medium and the diffusion coating on steels 45 and 45L. *Letters on materials*, 4(3(15)), 179–181. (In Russ.).
8. Augstkaln, A. I., Gur'yev, M. A. & Ivanov, S. G. (2022). The influence of heat treatment on the segregation of carbon in castings obtained by casting using gasified models. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 4(42), 74–79. (In Russ.).
9. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Lygdenov, B. D. & Gur'yev, M. A. (2023). Morphology and phase composition of the diffusion boride layer based on metallographic analysis of steel 45. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 1(43), 59–65. (In Russ.).
10. Gur'yev, M. A., Gur'yev, A. M., Ivanov, S. G. & Augstkaln, A. I. (2021). Surface alloying of cast iron castings. *Foundry production*, (7), 6–8. (In Russ.).
11. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Kosheleva, E. A. & Gur'yev, A. M. (2021). The problem of instrumental studies of the elemental composition of thin diffusion coatings on iron-carbon alloys. *Polzunovsky almanac*, (3), 3–6. (In Russ.).
12. Guryev, M. A., Ivanov, A. G., Ivanov, S. G. & Guryev, A. M. (2010). Strengthening of cast steels by surface alloying from boron-containing coatings. *Advances in modern natural science*, (3), 123. (In Russ.).
13. 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 primeneniym programmnoy kompleksa "Thixomet PRO". *Polzunovskiy vestnik*, (2), 165–168. (In Russ.).
14. Guryev, M. A., Augstkaln, A. I., Guryev, A. M. & Ivanov, S. G. (2020). Structure and properties of multicomponent diffusion coatings on gray cast iron SCh 25. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(1), 26–31. (In Russ.).
15. Guryev, M. A., Ivanov, S. G., Zemlyakov, S. A. & Guryev, A. M. (2019). Wear-resistant

high-chromium cast iron alloyed with copper. *Polzunovsky almanac*, (3), 136–138. (In Russ.).

16. Ivanov, S. G., Guryev, A. M., Markov, A. M., Guryev, M. A., Gabets, A. V. & Gabets, D. A. (2016). Study of the microstructure of diffusion coatings on ChMN-35M cast iron obtained by chemical-thermal treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 13(4), 497–500. (In Russ.).

17. Guryev, M. A., Ivanov, S. G., Kosheleva, E. A., Loginova, M. V. & Guryev, A. M. (2015). Study of the structure of cast composite material based on high-strength cast iron. *Polzunovsky almanac*, (2), 87–90. (In Russ.).

18. Ivanov, S. G., Guryev, A. M., Guryev, M. A., Malkov, N. V., Astakhov, D. A., Romanenko, V. V. & Chernykh, E. V. (2023). Study of the influence of heat treatment on the structure and properties of high-strength cast iron grade VCh 35. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 123–131. (In Russ.).

19. Ivanov, S. G., Guryev, A. M., Guryev, M. A., Astakhov, D. A., Malkov, N. V., Romanenko, V. V. & Chernykh, E. V. (2023). The influence of heat treatment on the structure and properties of chromium low-alloy wear-resistant cast iron ChKh3. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 92–98. (In Russ.).

20. Gur'yev, A. M., Gur'yev, M. A., Zemlyakov, S. A. & Ivanov, S. G. (2020). Vyyavleniye osobennostey morfologii i fazovogo sostava staley

metoda-mi spetsial'nogo metallograficheskogo travleniya. *V sb. tezisov XVI Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Evolyutsiya defektnykh struktur v kondensirovannykh sredakh»*, 83–84. (In Russ.).

Information about the authors

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. 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.

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

A. I. Augstkaln – Graduate Student, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

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

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

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

Статья поступила в редакцию 14.11.2023; одобрена после рецензирования 18.01.2024; принята к публикации 05.02.2024.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 23; approved after reviewing 18 Jan. 24; accepted for publication 05 Feb. 24.