

Научная статья

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

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.015

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА МАРКИ ВЧ 35

Сергей Геннадьевич Иванов^{1†}, Алексей Михайлович Гурьев², Михаил Алексеевич Гурьев³,
Никита Вадимович Мальков⁴, Даниил Андреевич Астахов⁵,
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, Россия

² Уханьский текстильный университет, ул. ФангЖи, 1, 430073, Ухань, КНР

¹ 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 nik777pik@mail.ru

⁵ apstahov69@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>

Аннотация. Проведены исследования влияния термической обработки на эксплуатационные свойства высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита. Отжиг проводили с целью повышения прочностных свойств материала, а так же пластичности и ударной вязкости. В работе представлены результаты микроструктурного анализа высокопрочного чугуна марки ВЧ 35 после термической обработки. Проведенные исследования показали, что термообработка, представляющая собой высокотемпературный отжиг, позволяет повысить степень глобулярности графитных включений, а также повысить степень совершенства их микроструктуры. Кроме того, проведенный отжиг привел к ликвидации колоний перлита с размерами менее 1–1,5 мкм.

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

Благодарности: Металлографические исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ.

Для цитирования: 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. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.015.

Original article

STUDY OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CAST IRON VCH 35

Sergey G. Ivanov^{1†}, Alexey M. Guryev², Mikhail A. Guryev³, Nikita V. Mal'kov⁴,
Daniil A. Astakhov⁵, 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, Russia

² Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China

¹ 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 nik777pik@mail.ru

⁵ apstahov69@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. Studies of the effect of heat treatment on the performance properties of ductile iron with nodular graphite have been carried out. Annealing was carried out in order to increase the strength properties of the material, as well as plasticity and impact strength. The paper presents the results of microstructural analysis of high-strength cast iron VCH 35 after heat treatment. The conducted studies have shown that in the process of heat treatment, which is high-temperature annealing, it makes it possible to increase the degree of globularity of graphite inclusions, as well as to increase the degree of perfection of their microstructure. In addition, the conducted annealing led to the elimination of pearlite colonies with sizes less than 1-1.5 μm .

Keywords: heat treatment, ductile cast irons, 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, A. M., Guryev, M. A., Mal'kov, N. V., Astakhov, D. A., Romanenko V. V. & Chernykh, E. V. (2023). Study of the effect of heat treatment on the structure and properties of high-strength cast iron VCH 35. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 123–131. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.015.

Введение

Чугуны в качестве конструкционных материалов применяются человечеством с давних времен. При этом считается, что чугуны имеют низкие показатели пластичности и ударной вязкости, подвержены трещинообразованию и по этой причине имеют ограниченное использование в качестве конструкционных материалов. В большей степени вышеперечисленными свойствами обладают серые чугуны с включениями графита пластинчатой формы. В середине 50-х годов 20 века была разработана технология получения нового вида чугунов – высокопрочные чугуны (ВЧ) – путем модифицирования расплава чугуна магнием. В высокопрочных чугунах графитовые включения имеют практически идеальную шарообразную форму и распределены равномерно в железной матрице. Такая структура значительно увеличивает прочностные свойства материала: чугуны, модифицированные магнием, обладают повышенной трещиностойкостью, высокой ударной вязкостью, износостойкостью, повышенной усталостной прочностью, и по своим эксплуатационным характеристикам приближаются к сталям. Вместе с тем, структура ВЧ содержит меньшее количество дефектов, чем сталь. Высокопрочные чугуны в настоящее время широко используются в промышленности, строительстве, для изготовления особо ответственных конструкционных деталей. Поэтому изучение свойств и разработка методов термического упрочнения ВЧ, позволяющих улучшить их эксплуатационные свойства, представляется актуальной задачей современного материаловедения [1-3].

В настоящее время основным способом получения ВЧ являются различные литейные технологии [4-6]. Для улучшения эксплуатационных свойств чугуны подвергают

термической обработке. Высокопрочные чугуны подвергают пламенной или высокочастотной поверхностной закалке. Такие способы термообработки упрочняют поверхность и, в тоже время, сохраняет хорошие пластические и вязкие свойства, что повышает износостойкость материала. Так же ВЧ подвергают некоторым видам химико-термической обработки – азотированию или сульфидированию, что повышает ресурс работы упрочненных изделий в несколько раз [7-10]. В настоящее время способам термической обработки деталей из чугуна с шаровидным графитом придается большое значение [11, 12].

Известны работы, направленные на разработку технологий с последующей термической обработкой плоских заготовок из высокопрочных чугунов больших размеров (до 5000 мм) [13, 14].

Целью данной работы является исследование эволюции структуры и механических свойств высокопрочных чугунов марки ВЧ 35 в результате термической обработки.

Методика и материалы

В настоящей работе проведен химический анализ состава и микроструктурный анализ образца, выполненного из высокопрочного чугуна марки ВЧ 35, который относится к высокопрочным сплавам с шаровидной формой графита. Шаровидный графит в представленном на анализ образце, равномерно распределен по объему металлической матрицы (Рис.1), что определяет высокие механические и эксплуатационные свойства изделия из такого чугуна. Подобные исследованному сплаву материалы применяются для изделий с высокой прочностью и удовлетворительной пластичностью [15]: турбинное оборудование АЭС и ГЭС, элементы котлов и трубопроводов, гидрозатво-

ры, патрубки компрессоров, зубчатые колеса, шестерни. Благодаря высоким прочностным характеристикам и удовлетворительной ударной вязкостью изделия из ВЧ 35 выдерживают высокие статические и динамические нагрузки, трение при повышенных температурах.

Выплавка чугуна осуществлялась в индукционной печи KGPS–350-0,5 (Китай) с набивным тиглем емкостью 500 кг. В качестве футеровочного материала применялась сухая нейтральная набивная масса на основе корунда. 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 S (не более 0,02 % масс.) и наличия других демодифицирующих элементов. Низкое содержание серы позволяет получать шаровидную форму графита в процессе кристаллизации сплава. Расплав чугуна обрабатывался комплексным модификатором ФСМг6, при этом модификатор подавался на струю 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.

Отливку образцов, представленных на анализ, получали методом литья по газифицируемым моделям. Подвод металла к модели (пенополистирол марки Н4S с насыпной плотностью 21 кг/м³) осуществлялся сифоном. После затвердевания отливок их выбивали и осуществляли охлаждение на воздухе. После остывания отливки очищали от огнеупорного покрытия и остатков пригоревшего песка на дробеметной установке.

Для металлографического анализа из готовых отливок отрезали заготовки темплетов размерами 20x20x40 мм. Вырезку темплетов осуществляли на прецизионном отрезном станке «Microcut-201», затем осуществляли запрессовку темплетов в бакелитовый компаунд при помощи металлографического прессы «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 [16-25].

Результаты и обсуждения

Химический состав исследуемого материала образца представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав чугуна

Table 1. The chemical composition of cast iron

Элемент	Химический состав чугуна в образце	Состав чугуна ВЧ-35 ГОСТ 7593-85
	Содержание элементов, %	
C	3,276±0,186	2,7-3,8
Si	1,180±0,008	0,8-2,9
Mn	0,163±0,030	0,2-0,6
P	0,007±0,006	<0,02
S	0,008±0,000	<0,10
Cr	0,031±0,002	<0,05
Ni	0,029±0,004	--
Cu	0,033±0,007	--
W	0,333±0,050	--
Mg	0,017± 0,003	--
La	>0,05	--
Ce	>0,10	--

На рис.1 представлена микроструктура полированного образца до его травления. Форма включений графита – шаровидная (ШГф5), средний диаметр включений графита равен 20,9 мкм (по ГОСТ 3443-87 – ШГд2), включе-

ния равномерно распределены по объему материала (ШГр1). Объемная доля включений графита составляет 9,32 % об. Графитные включения в соответствии с ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Мето-

ды определения структуры» распределены следующим образом: ВГф1 (0,3 %) – ВГф2 (0,084 %) – ВГф3 (5,89 %) – ШГф1 (0,043 %; д45) – ШГф2 (0,12 %; д45) – ШГф3 (1,38 %; д90) – ШГф4 (21,1 %; д90) – ШГф5 (71,1 %; д45). Более развернутое распределение включений графита по размерам и форме представлено на рис.2. Определение структурно – фазового состояния матрицы проводилось на травленном образце (Рис.3). Травление осуществлялось реактивом «Ниталь», представляющего собой 4 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

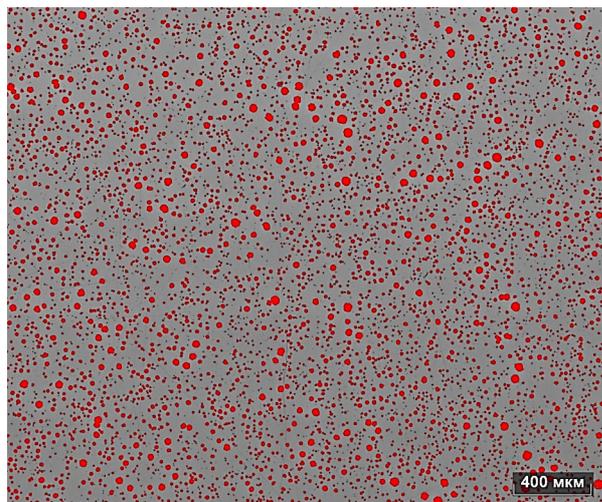


Рис.1. Микроструктура полированного образца для оценки формы графита, x100

Fig.1. Microstructure of a polished sample for evaluating the shape of graphite, x100

Как видно из рис.2, наибольшая доля включений графита приходится на их диаметр от 14,6 до 28,4 мкм – 50 % включений, 31,2 об. % включений имеют диаметр в диапазоне от 0,84 до 14,6 мкм. Таким образом, доля высокодисперсных графитных включений составляет 81,2 об. % от общего объема графитных включений. Средний диаметр включений составил 20,1 мкм. 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. Обычно к глобулярным частицам относят частицы, имеющие фактор формы, больший 0,7 [26-34]. Таким образом, из данных о факторе формы F2 включений графита следует, что подавляющий (70,4 об. %) процент графитных

включений имеют очень близкую к глобулярной форму.

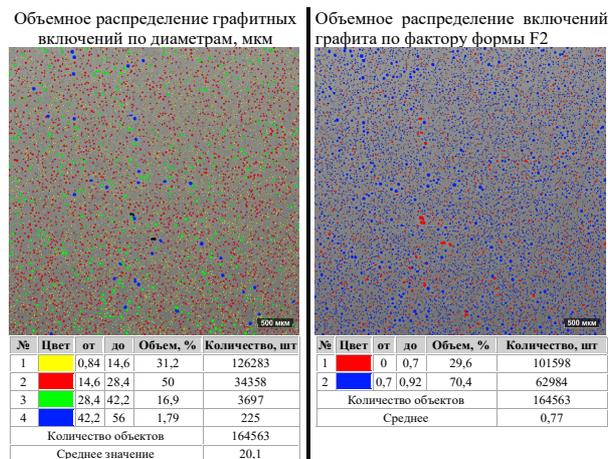


Рис.2. Результаты исследования распределения графитных включений по размерам и степени глобулярности

Fig.2. The results of the study of the distribution of graphite inclusions by size and degree of globularity

Как видно из представленного на рис.3 изображения микроструктуры, металлическая матрица чугуна практически полностью состоит из феррита. Ферритные чугуны обладают достаточно высокой пластичностью.

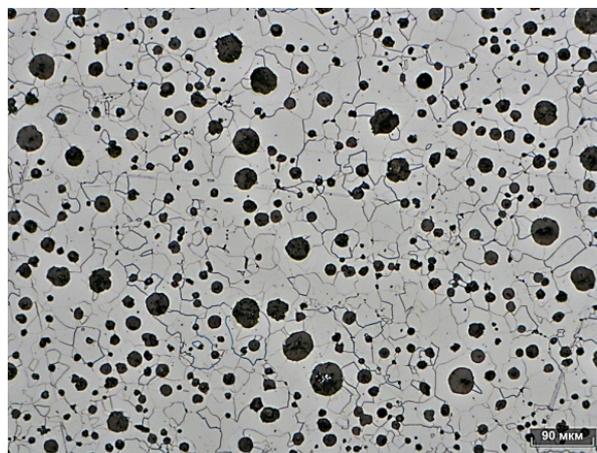


Рис.3. Микроструктура образца после травления, x100

Fig.3. Sample microstructure after pickling, x100

При большем увеличении (x500 и x1000 крат) в образце были обнаружены включения перлита, локализованные преимущественно по границам зерен (Рис.4, 5). При увеличении x1000 дисперсность перлита рассмотреть не удалось, что позволяет отнести данные выделения к трооститным.

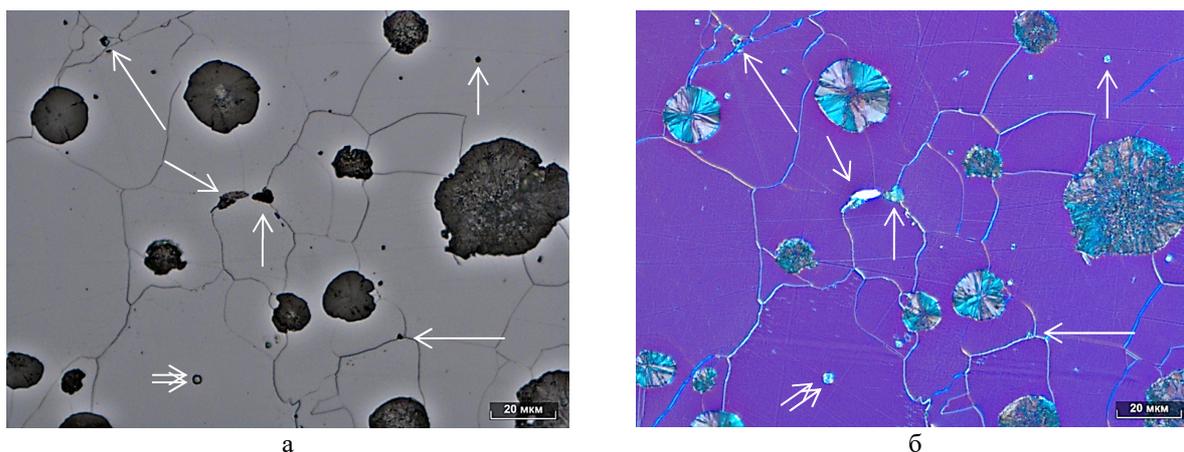


Рис.4. Образец после травления: а – без поляризации, б – микроструктура в поляризованном свете. Стрелками указаны зародыши перлита, двойной стрелкой обозначено выделение третичного цементита в ферритном зерне

Fig.4. Sample after pickling: a – without polarization, b – microstructure in polarized light. Arrows indicate pearlite nuclei, the double arrow indicates the separation of tertiary cementite in ferrite grain

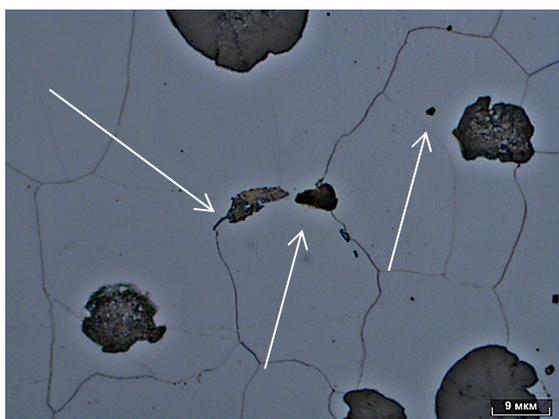


Рис.5. Чугунный образец после травления. Стрелками указан перлит

Fig.5. Cast iron sample after pickling. Arrows indicate perlite

Равномерное распределение перлита в виде мелких включений по границам зерен в основной фазе повышает прочность сплава, при этом не вызывая резкого снижения пластичности. Для повышения степени совершенности микроструктуры графитных выделений, а также гомогенизации их структурно-фазового состояния, высокопрочные чугуны подвергают операции отжига при температуре 700 °С, с выдержкой при этой температуре и последующим медленным охлаждением вместе с печью до 400 °С, далее – на воздухе. Такой вид термической обработки позволяет сформировать дополнительное количество глобулярных включений графита, а также повысить степень совершенности глобул (Рис.4, 5). На рис.4б четко

видно, что в результате проведенного отжига часть графитных включений дооформилась в глобулярные. Такие частицы, окончательно сформировавшиеся в ходе высокотемпературного отжига, на фотографии микроструктуры в поляризованном свете имеют характерное строение в виде центрального ядра с отходящими от него радиальным «лучами». Тогда как частицы, сформировавшиеся непосредственно в результате сфероидизации графита в процессе модификации расплава магниевым модификатором, такого строения не демонстрируют. При этом, в силу того, что в окрестностях таких частиц углерода практически не имелось, так как весь углерод был ими поглощен из окружающих объемов металла в процессе формирования, данные частицы имеют характерную пористую морфологию, которая практически не изменяется в результате термообработки. Кроме того, проведенный высокотемпературный отжиг позволил снизить количество перлитных колоний, так как более мелкие колонии в процессе отжига растворились, а углерод, входивший в их состав, пошел на формирование глобул графита.

Закключение

Проведенные исследования показали, что в процессе термообработки, представляющей собой высокотемпературный отжиг, позволяет повысить степень глобулярности графитных включений, а также повысить степень совершенства их микроструктуры. Кроме того, проведенный отжиг привел к ликвидации колоний

перлита с размерами менее 1-1,5 мкм, а также к повышению степени совершенства (сплошности и степени глобулярности) графитных включений. Все вышеперечисленные факторы, в свою очередь, привели к повышению работоспособности и ресурса работы отливок из высокопрочного чугуна за счет повышения пластичности и ударной вязкости на 20-27 %.

Список литературы

1. Конструкционные материалы / под ред. Б. Н. Арзамасова. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 446 с.
2. Лернер Ю.С. и др. Некоторые тенденции в производстве отливок из чугуна с шаровидным графитом за рубежом // Литейное производство. 1985. № 12. С. 6–8.
3. Хузин Д.Р. Экономическая эффективность применения труб из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Вестник современных исследований. 2018. № 12(27). С. 499–501.
4. Писаренко Г.А., Филиппов А. С.. Отливки металлургического оборудования из чугуна с шаровидным графитом. Свердловск: Металлургиздат, 1960. 206 с.
5. Грачев В.А. Производство высокопрочного чугуна с шаровидным графитом при плавке чугуна в газовых вагранках // Литейщик России. 2016. № 8. С. 8–12.
6. Гурьев М.А., Власова О.А., Гурьев А.М., Фильчаков Д.С., Малькова Н.Ю. Изготовление стальных и чугунных деталей с упрочненным поверхностным слоем литьем по газифицируемым моделям // Ползуновский альманах. 2013. № 2. С. 86–91.
7. Бокштейн Б.С. и др. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна / справочник: в 3 т. М.: Интернет Инжиниринг, 2004. 24 с.
8. Лалазарова Н.А., Донченко Д.А., Пуятин Л.И. Влияние термической обработки на обрабатываемость высокопрочного чугуна // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2018. № 82. С. 86–91.
9. Кузьмин Б.А. и др. Металлургия. Металловедение и конструкционные материалы. М: Высшая школа, 1977. 190 с.
10. 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.
11. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Земляков С.А., Грешилов А.Д., Иванов А.Г. Способ изготовления и упрочнения деталей из чугунов и сталей. Патент на изобретение RU 2440869 С1, 27.01.2012. Заявка № 2010145915/02 от 10.11.2010.
12. Хохлова А.В., Картонова Л.В. Практические рекомендации по термической обработке высокопрочных чугунов // В сб. статей Всероссийской научно-практической конференции «Интеграция науки, общества, производства и промышленности: проблемы и перспективы». Уфа, 2020. С. 33–36.
13. Трайно А.И., Пименов А.Ф., Бахтаров Г.Л., Бородин Ю.В., Карташов В.И., Сарычев И.С., Круглов А.В. Способ термической обработки центробежно-литой трубы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Патент на изобретение RU 2175986 С1, 20.11.2001. Заявка № 2000107374/02 от 28.03.2000.
14. Пономарев А.С., Сосенушкин Е.Н., Артес А.Э., Климов В.Н. Влияние обработки давлением на микроструктуру и качество изделий из высокопрочного чугуна // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3(15). С. 115–120.
15. Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс] / Официальный сайт http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1497. Дата обращения 19.02.2023.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
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. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Земляков С.А., Гурьев А.М. Износостойкий высокохромистый чугун, легированный медью // Ползуновский альманах. 2019. № 3. С. 136–138.
24. 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.
25. 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.
26. Kazakov A.A., Kiselev D.V. Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys // Microstructure. Microscopy and Microanalysis. 2015. V. 21, N 3. P. 457–458.
27. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the Origin of Nonmetallic Inclusions in High-Strength Low-Alloy Steel Using Automated Feature Analysis // Microscopy and Microanalysis. 2015. V. 21, N 3. P. 1755–1756.
28. 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.
29. Kazakov A., Kovalev P., Ryaboshuk S. Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products // CIS Iron Steel Rev. 2007. V. 1–2. P. 7.
30. Kazakov A., Lyubochko D. Nonmetallic Inclusions and Acicular Ferrite in Arc Welds of Pipeline Steels // Microscopy and Microanalysis. 2015. V. 21, N 3. P. 1749–1750.
31. Kazakov A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure // Metallogr. Microstruct. Anal. 2016. V. 5. P. 294–301.
32. ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures. 2004. P. 493–512.
33. Казаков А.А., Киселев Д.В., Сыч О.В., Хлусова Е.И. Количественная оценка структурной неоднородности в листовом прокате из хладостойкой низколегированной стали для интерпретации технологических особенностей его изготовления // Черные металлы. 2020. № 11. С. 4.
34. Казаков А.А., Киселев Д.В., Сыч О.В., Хлусова Е.И. Методика оценки микроструктурной неоднородности по толщине листового проката из хладостойкой низколегированной стали арктического применения // Черные металлы. 2020. № 9. С. 11.

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 университета им. И.И. Ползунова.

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

Д. А. Астахов – 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

1. (2007). Structural materials / ed. B. N. Arzamasova. M.: Publishing Center «Academy». P. 446. (In Russ.).
2. Lerner, Yu. S. et al. (1985). Nekotoryye tendentsii v proizvodstve otlivov iz chuguna s sharovidnym grafitom za rubezhom. *Liteynoye proizvodstvo*, 12, 6–8. (In Russ.).
3. Khuzin, D. R. (2018). Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya trub iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*, 12(27), 499–501. (In Russ.).
4. Pisarenko, G. A. & Filippov, A. S. (1960). Otlivki metallurgicheskogo oborudovaniya iz chuguna s sharovidnym grafitom. Sverdlovsk: Metallurgizdat. P. 206. (In Russ.).
5. Grachev, V. A. (2016). Proizvodstvo vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom pri plavke chuguna v gazovykh vrankakh. *Liteyshchik Rossii*, 8, 8–12. (In Russ.).
6. Gur'yev, M. A., Vlasova, O. A., Gur'yev, A. M., Fil'chakov, D. S. & Mal'kova, N. Yu. (2013). Izgotovleniye stal'nykh i chugunnykh detaley s uprochnennym poverkhnostnym sloym lit'yem po gazifitsiruyemykh modelyam. *Polzunovskiy al'manakh*, 2, 86–91. (In Russ.).
7. Bokshetyn, B. S. et al. (2004). Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali i chuguna / spravochnik: v 3 t. M.: Internet Inzhiniring. P. 24. (In Russ.).
8. Lalazarova, N. A., Donchenko, D. A. & Putyatina, L. I. (2018). Vliyaniye termicheskoy obrabotki na obrabatyvayemost' vysokoprochnogo chuguna. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 82, 86–91. (In Russ.).
9. Kuz'min, B. A. et al. (1977). Metallurgiya. Metallovedeniye i konstruktsionnyye materialy. M: Vysshaya shkola. P. 190. (In Russ.).
10. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Kosheleva, E. A., Loginova, M. V. & Gur'yev, A. M. (2015). Issledovaniye struktury litogo kompozitsionnogo materiala na osnove vysokoprochnogo chuguna. *Polzunovskiy al'manakh*, 2, 87–90. (In Russ.).
11. Gur'yev, A. M., Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Zemlyakov, S. A., Greshilov, A. D. & Ivanov, A. G. Sposob izgotovleniya i uprochneniya detaley iz chugunov i staley. Patent na izobreteniya RU 2440869 C1, 27.01.2012. Zayavka N 2010145915/02 ot 10.11.2010. (In Russ.).
12. Khokhlova, A. V. & Kartonova, L. V. (2020). Prakticheskiye rekomendatsii po termicheskoy obrabotke vysokoprochnykh chugunov. V sbornike statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Integratsiya nauki, obshchestva, proizvodstva i promyshlennosti: problemy i perspektivy». Ufa. P. 33–36. (In Russ.).
13. Trayno, A. I., Pimenov, A. F., Bakhtarov, G. L., Borodin, Yu. V., Kartashov, V. I., Sarychev, I. S. & Kruglov, A. V. Sposob termicheskoy obrabotki tsentrobezhno-litoy truby iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom. Patent na izobreteniya RU 2175986 C1, 20.11.2001. Zayavka № 2000107374/02 ot 28.03.2000. (In Russ.).
14. Ponomarev, A. S., Sosenushkin, E. N., Artes, A. E. & Klimov, V. N. (2011). Vliyaniye obrabotki davleniyem na mikrostrukturu i kachestvo izdeliy iz vysokoprochnogo chuguna. *Vestnik MGTU «Stankin»*, 3(15), 115–120. (In Russ.).
15. Marochnik stali i splavov [Elektronnyy resurs] / Ofits. sayt http://www.splavkhar'kov.com/mat_start.php?name_id=1497. Data obrashcheniya 19.02.2023. (In Russ.).
16. 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 sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(10), 130–133. (In Russ.).
17. 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.).
18. 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.).
19. Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Gur'yev, A. M. & Romanenko, V. V. (2020). Fazovyy analiz boridnykh kompleksnykh diffuzionnykh sloev na uglerodistykh stalyakh pri pomoshchi tsvetnogo travleniya. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(17), 74–77. (In Russ.).
20. 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.

21. 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.).
22. 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.).
23. Gur'yev, M. A., Ivanov, S. G., Zemlyakov, S. A. & Gur'yev, A. M. (2019). Iznosostoykiy vysokokhromistyy chugun, legirovanny med'yu. *Polzunovskiy al'manakh*, 3, 136–138. (In Russ.).
24. Ivanov, S. G. Gur'yev, A. M., Markov, A. M., Gur'yev, M. A., Gabets, A. V. & Gabets, D. A. (2016). Issledovaniye mikrostruktury diffuzionnykh pokrytiy na chugune CHMN-35M, poluchennykh khimiko-termicheskoy obrabotkoy. *Fundamental'nyye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(13), 497–500. (In Russ.).
25. 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'nyye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 1(17), 26–31. (In Russ.).
26. 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.
27. Kazakov, A. A., Ryaboshuk, S. V., Lyubochko, D. A. & Chigintsev, L. S. (2015). Research on the Origin of Nonmetallic Inclusions in High-Strength Low-Alloy Steel Using Automated Feature Analysis. *Microscopy and Microanalysis*, 3(21), 1755–1756.
28. Vander Voort, G., Pakhomova, O. & Kazakov, A., (2016). Evaluation of Normal Versus Non-Normal Grain Size Distributions. *Materials Performance and Characterization*, 5, 521–534.
29. Kazakov, A., Kovalev, P. & Ryaboshuk, S. (2007). Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products. *CIS Iron Steel Rev.*, (1–2), 7.
30. Kazakov, A. & Lyubochko, D. (2015). Nonmetallic Inclusions and Acicular Ferrite in Arc Welds of Pipeline Steels. *Microscopy and Microanalysis*, 3(21), 1749–1750.
31. Kazakov, A. & Kiselev, D. (2016). Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure. *Metallogr. Microstruct. Anal.*, (5), 294–301.
32. (2004). ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures. P. 493–512.
33. Kazakov, A. A., Kiselev, D. V., Sych, O. V. & Khlusova, E. I. (2020). Kolichestvennaya otsenka strukturnoy neodnorodnosti v listovom prokate iz khladostoykoy nizkolegirovannoy stali dlya interpretatsii tekhnologicheskikh osobennostey yego izgotovleniya. *Chernyye metally*, 11, 4. (In Russ.).
34. Kazakov, A. A., Kiselev, D. V., Sych, O. V. & Khlusova, E. I. (2020). Metodika otsenki mikrostrukturnoy neodnorodnosti po tolshchine listovogo prokata iz khladostoykoy nizkolegirovannoy stali arkticheskogo primeneniya. *Chernyye metally*, 9, 11. (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.

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.

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

D. A. Astakhov – 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 06.01.2023; одобрена после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 27.01.2023.

The article was received by the editorial board on 06 Jan. 23; approved after reviewing 20 Jan. 23; accepted for publication 27 Jan. 23.