

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-3-64-71

УДК 621.74.[046+043.1]:669.15-196.53:004.942

Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ, канд. техн. наук

П. Ю. ДУВАЛОВ

С. А. СУХОЦКИЙ, канд. техн. наук, доц.

В. М. АНДРИЕНКО

Институт технологии металлов НАН Беларуси (Могилев, Беларусь)

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ, БЛИЗКИХ К ЭВТЕКТИКЕ, ПРИ ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ

Аннотация

Износостойкие хромистые чугуны, по составу близкие к эвтектике Fe–Cr–C, широко используются в промышленности. Вместе с тем их теплофизические и механические свойства существенно зависят от микроструктуры, которая может быть достаточно разнообразной даже в пределах одной отливки. Делается попытка автоматического распознавания геометрических свойств карбидной фракции чугуна – распределения по размерам, ориентации, и связи этих свойств с параметрами получения отливки.

Ключевые слова:

износостойкие высокохромистые чугуны, износостойкие хромистые чугуны, эвтектика, микроструктура, свойства карбидной фракции.

Для цитирования:

Оценка параметров микроструктуры высокохромистых чугунов, близких к эвтектике, при литье в песчаные формы / Ю. А. Лебединский, П. Ю. Дувалов, С. А. Сухоцкий, В. М. Андриенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 3 (88). – С. 64–71.

Введение

Количественная оценка микроструктуры сплавов является одним из важных методов исследования как свойств самого сплава, так и методом для сравнения свойств сплавов, полученных различным способом. Такая оценка все чаще в последнее время делается на основе автоматического распознавания элементов микроструктуры. К сожалению, часто сложная морфология различных фаз в сплаве значительно затрудняет такое распознавание, а его механические свойства существенно зависят от деталей морфологии, сочетания различных видов морфологии фаз друг с другом.

Одним из случаев, когда возможно распознавание и оценка свойств микроструктуры является карбидная фаза износостойких высокохромистых чугунов. Для часто используемого химического состава (~3,5 %...3,6 % C,

17 %...18 % Cr), близкого к эвтектике системы Fe–Cr–C, микроструктура карбидов представляет собой сечения изогнутых трехмерных эвтектических пучков [1]. Поэтому карбидная фаза в сечении представляет из себя в основном объекты эллиптической формы.

Объекты с аппроксимацией такой простой формой могут быть оценены любой программой распознавания металлографических изображений – FiJi, Volocity, MatLab ImageJ и т. п. Выбор авторами пакета MatLab обусловлен его широким распространением и известной удовлетворительной точностью результатов. Система включает в себя большое число характеристик таких эллипсов. Среди них общая площадь объекта, длина малой оси эллипса – толщина линии эвтектики, ориентация эллипса и т. п. По любому числу выбранных критериев объекты могут быть оставлены на изображении или удалены из него, что дает возможность оценивать

статистические свойства, например распределение по площади, или по толщине, или по ориентациям только в группе выбранных ранее объектов.

Постановка задачи

В [2] авторы исследовали теплопередачу между расплавом эвтектического износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) и твердой стальной вставкой при литье в комбинированную форму. Изучалась возможность ускорения затвердевания. Однако теплофизические параметры такого чугуна весьма вариabельны и сильно зависят от микроструктуры. Поэтому в работе было предложено далее исследовать, какую информацию можно получить на основе автоматизированного анализа микроструктуры ИЧХ.

Здесь для анализа выбраны аустенитные хромистые чугуны, в которых присутствуют также продукты распада аустенита. Они достаточно широко используются в промышленности, особенно при производстве больших отливок [3, 4]. Такие отливки получают в основном путем охлаждения в формах из холоднотвердеющей смеси (ХТС). Для ряда отливок возможно использование и комбинированных форм [5, 6].

На данном этапе для упрощения распознавания объектов (карбидов) отливку из хромистого чугуна предпочтительно отжигать. Это позволяет получить контраст между светлыми участками карбидов и темными участками матрицы, независимо от ее собственного фазового состава. Параметры отжига: нагрев в печи до 940 °С...960 °С, выдержка 1...1,5 ч, охлаждение с печью.

Снимки микроструктур в RGB-формате размером 2000 × 2000 сделаны на центральном сечении 5 × 5 см отливки 9 × 5 × 5 см, охлаждаемой в холоднотвердеющей смеси. Фотографии (рис. 1) сделаны «крестом» на прямых, проходящих через центр сечения.

Сначала RGB-изображение преобразуется в 256gray, затем в бинарное двухцветное изображение, на котором дальше происходит распознавание белых объектов как эллипсов. Если на исходном изображении присутствуют полезные для распознавания оттенки цветов, то оно сначала преобразуется в HSV-формат, где на основе оттенка H выделяются нужные компоненты.

Таким образом, фотографии сделаны на горизонтальной и вертикальной прямых, проходящих через центр сечения отливки. Первые сделаны на левом и нижнем краях отливки, далее с шагом 5 мм. Увеличение ×200, размер пиксела 0,27 мкм.

Общие характеристики микроструктуры на всем изображении

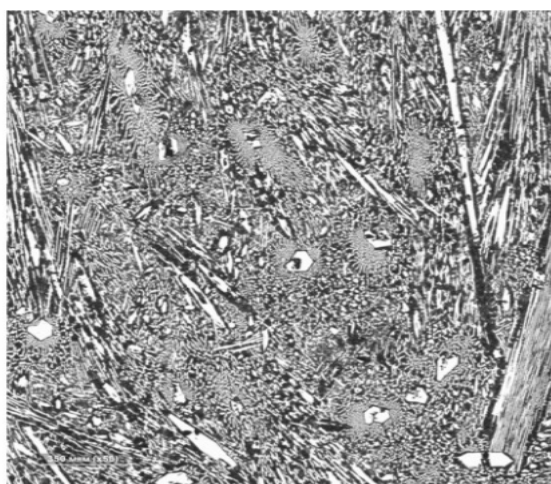
На бинарном изображении выделяется набор эллипсов, далее идет оценка параметров этих объектов, их площадь.

На первом этапе из рассмотрения удаляются объекты площадью менее 10 мкм². Это фрагменты эвтектических и других карбидов малого размера, поскольку при отжиге возможно их незначительное укрупнение при медленном охлаждении [7]. При этом большие карбиды увеличиваются в размере, малые же диссоциируют. Доля последних в общей площади карбидной фракции мала, но большое их количество иногда может значительно изменять средние параметры объектов – эвтектических карбидов, а также твердость и износостойкость таких чугунов. Ввиду возможного размытия некоторых изображений количество таких мелких объектов может существенно меняться, поскольку их интенсивность тогда близка к линии отсечки черное-белое. Кроме того, такие малые объекты не должны значительно влиять на износостойкость описываемых чугунов при использовании с абразивами с большой кинетической энергией [8].

а)



б)



в)

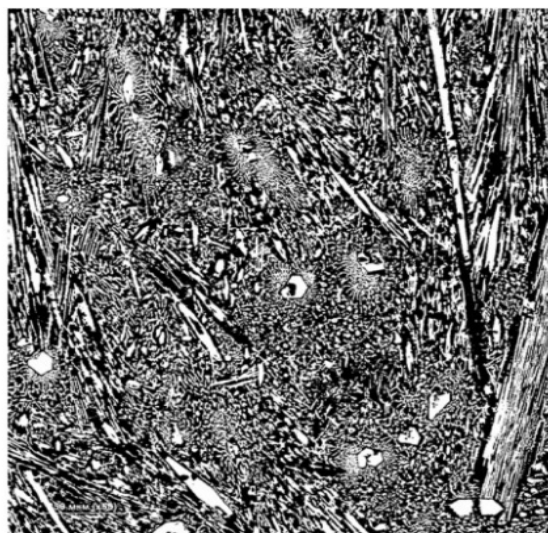


Рис. 1. Начальная трансформация микрофотографий: а – исходная фотография ($\times 200$); б – монохромная фотография (256 оттенков серого); в – бинарное изображение (только белый или черный цвета)

Далее оценены общая доля карбидной фракции и средняя площадь объекта. В табл. 1 и 2 приведены эти средние по изображению параметры

микроструктуры. Средний размер здесь рассчитан исходя из круглой формы объекта. Жирным выделены значения вблизи центра сечения.

Табл. 1. Параметры микроструктуры по вертикальной линии сечения отливки

Высота сечения от низа отливки, мм	Количество частиц, шт.	Доля карбидов, %	Средняя площадь, мкм ²	Средний размер, мкм
2	1466	0,38	79	10
7	1216	0,33	84	10
12	1245	0,34	84	10
17	1326	0,35	81	10
22	1212	0,37	95	11
27	1109	0,38	105	12
32	1178	0,42	110	12
37	1326	0,35	81	10
42	982	0,39	122	12
47	1083	0,34	96	11

Табл. 2. Параметры микроструктуры по горизонтальной линии сечения отливки

Расстояние от торца отливки, мм	Количество частиц, шт.	Доля карбидов, %	Средняя площадь, мкм ²	Средний размер, мкм
2	2034	0,37	55	8,4
7	1287	0,33	80	10
12	900	0,38	129	13
17	1107	0,38	107	12
22	565	0,39	212	16
27	1069	0,39	114	12
32	1317	0,38	88	11
37	1484	0,35	74	10
42	1494	0,35	73	10
47	1123	0,36	100	11

Максимальное количество эвтектических карбидов и минимальная их площадь зарегистрированы вблизи краев отливки.

Вместе с тем именно распределение карбидов в матрице играет основную роль в определении износостойко-

сти высокохромистых чугунов [1].

Толщина карбидов

В работе проведена оценка размера малой оси эллипса – толщина карбидной линии или, по сути, размер по-

перечного сечения. Поскольку длина трехмерного карбида не совпадает с его длиной в изучаемом сечении [1], то его ширина является более информативным показателем. Распределение объектов по ширине показано для трех случаев на вертикальной прямой – вблизи нижнего края отливки, на расстояниях 10 и 20 мм от края (рис. 2). По оси X отложены номера карбидов, отсортированные по

возрастанию размера их поперечного сечения.

Анализ графика показывает, что распределение карбидов в области малых толщин достаточно близко друг к другу. Однако, как будет видно далее, карбиды малых толщин могут группироваться различным образом в разных участках отливки.

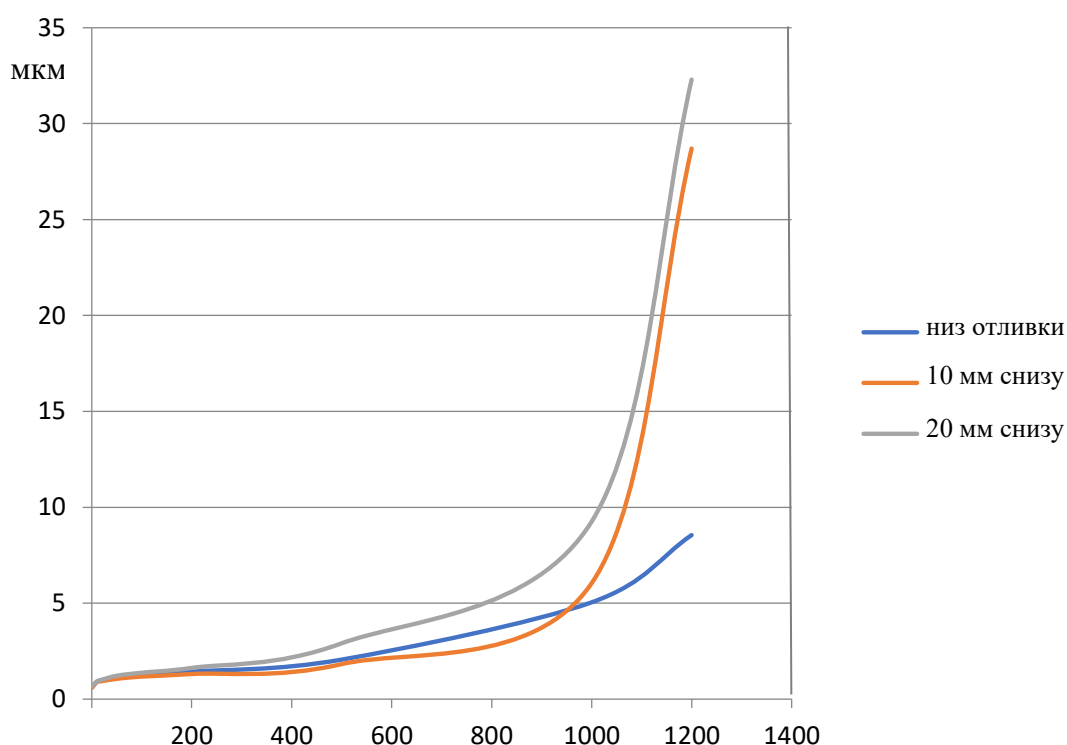


Рис. 2. Распределение карбидов по размеру их поперечного сечения

Преимущественная ориентация карбидов

В табл. 3 представлена оценка ориентации эллипса – средний угол между длинной осью и горизонталью.

На нижней части отливки (вертикаль) все углы больше 45 град, что говорит о выделенной ориентации карбидов по вертикали. Очевидно, карбиды ориентируются по градиенту температуры, который в нижней части отливки остается стабильно направленным по вертикали. Тепловой контакт между ни-

зом отливки и ХТС остается постоянным ввиду веса отливки и давления на нижнюю часть литейной формы.

На боковой поверхности отливки, двигаясь к центру, имеем различные преимущественные ориентации карбидов. Кроме того, иногда угол близок к 45 град, карбиды ориентированы равномерно по направлениям. По-видимому, это связано с быстрым разрушением теплового контакта ХТС и отливки на боковой поверхности и практическим отсутствием градиента температуры в боковом направлении.

Табл. 3. Средний угол между главной осью эллипса и осью X

Параметр	Значение				
Расстояние от края отливки, мм	5	10	15	20	25
Средний угол по вертикальной оси, град	57,6	57,0	65,7	51,6	55,5
Средний угол по горизонтальной оси, град	44,0	58,9	46,1	34,4	31,7

Группирование малых карбидов

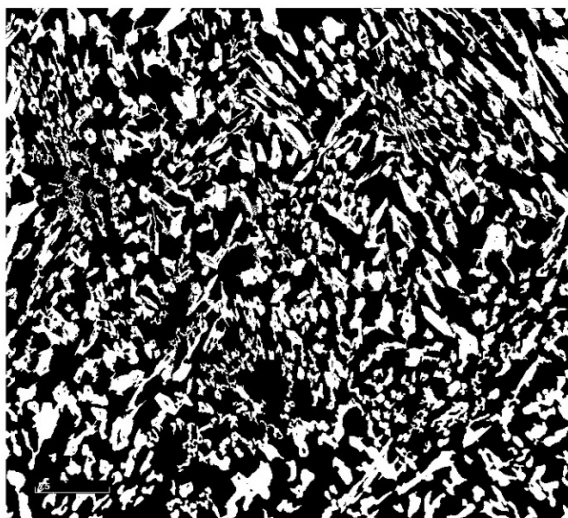
Часть объектов заранее могут быть удалены из рассмотрения, например, карбиды слишком большой или малой толщины и т. п. Данным методом можно разделить изображение на «крупные» и «мелкие» эвтектические карбиды и оценить пространственную неоднородность изображения, а также появление достаточно больших простран-

ственных зон с малой толщиной.

На краях отливки (рис. 3) заметны целые участки относительно большой площади с малой толщиной эллипсов.

Вместе с тем при удалении от края отливки (рис. 4) такие участки пропадают, эллипсы малой толщины распределены более равномерно. Возможно, это связано с меньшей скоростью теплооттока из этой области.

а)



б)

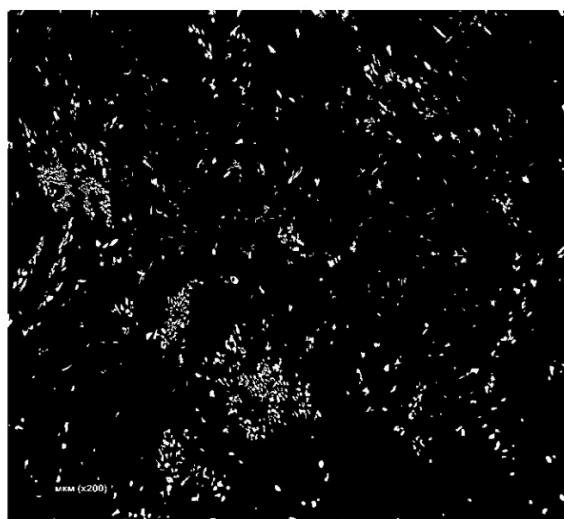


Рис. 3. Выделенные части изображения участка снизу отливки: а – эвтектика с большой толщиной карбида; б – эвтектика с малой толщиной карбида

Имеются данные о том, что механические свойства сплавов с различными формами неоднородности, в том числе с гетерогенной микроструктурой, коррелируют с ее степенью неоднородности [9–13]. Возможно, такая неоднородность влияет и на износостойкость хромистых чугунов при большой кине-

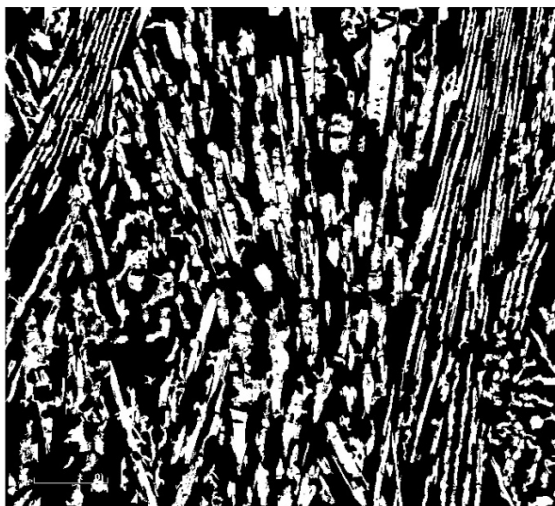
тической энергии абразива, даже в большей степени, чем величина карбидной фракции и подобные интегральные параметры [9].

В связи с этим интерес представляет оценка площади «скоплений» эвтектических карбидов с малым шагом (см. рис. 3, б и 4, б) внутри структур с

достаточно крупными эвтектическими карбидами (см. рис. 3, *a* и 4, *a*). Для сталей существует достаточно большое количество различных математических определений таких скоплений в гетеро-

генной структуре, которая характеризуется значительным изменением микроструктуры в различных областях пространства [9–13].

a)



б)

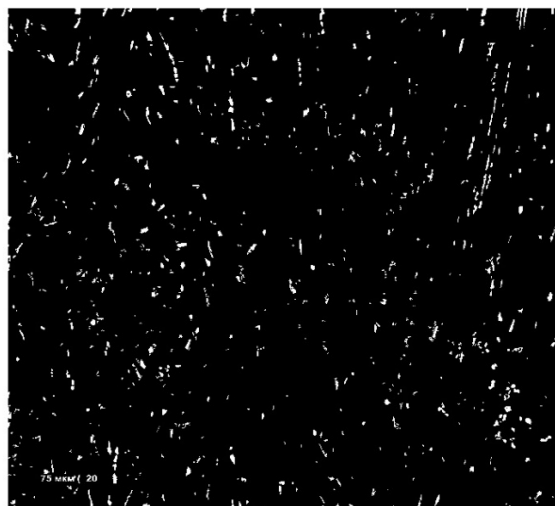


Рис. 4. Выделенные части изображения участка ближе к центру отливки: *a* – эвтектика с большой толщиной карбида; *б* – эвтектика с малой толщиной карбида

Можно предположить, что наличие достаточно большого количества участков с отличным от среднего размером поперечных сечений эвтектических карбидов и постоянством этой толщины на участке приведет к улучшению износостойкости. Конечно, при условии, что такие участки должны быть определенных размеров.

Заключение

Проведен анализ некоторых особенностей карбидной фракции в износостойких хромистых чугунах, близких к эвтектике, отлитых в форму из ХТС.

Такая форма часто используется для производства больших отливок.

Получено распределение карбидов по размерам, ширине и ориентации. Выделены некоторые особенности ориентации карбидов в различных частях отливки.

Показано, что вблизи периметра отливки в некоторых зонах имеет место рост эвтектики с меньшей толщиной, чем обычно. Наличие гетерогенных зон эвтектики ИЧХ и их влияние на механические свойства отливки требуют дальнейшего изучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tabrett, C. P. Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys / C. P. Tabrett, I. R. Sare, M. R. Ghomashchi // *International Materials Reviews*. – 1996. – Vol. 41, № 2. – P. 61–81.
2. Особенности теплообмена хромистого чугуна со стальной вставкой-холодильником / Ю. А. Лебединский, Г. П. Короткин, В. А. Дементьев, П. Ю. Дуvalов // *Сталь*. – 2022. – № 7. – С. 48–51.

3. The Effect of Heat Treatments on the Properties of a Ferritic High-Chromium Cast Iron / A. Eljersify, K. Aouadi, M. Ben Ali [et al.] // Journal of material engineering and performance. – 2023. – Vol. 32, iss. 18. – P. 8262–8273.
4. Влияние времени выбивки на структуру и свойства белого чугуна ИЧХ18ВМ / А. Г. Анисович, В. М. Ильюшенко, П. Ю. Дувалов, В. М. Андриенко // Metallurgia и машиностроение. – 2022. – № 1. – С. 28–30.
5. Влияние термической обработки на механические свойства износостойкого хромистого чугуна / Е. И. Марукович, В. М. Ильюшенко, А. Г. Анисович [и др.] // Metallurgia и машиностроение. – 2021. – № 5. – С. 19–22.
6. Исследование модифицирования хромистых чугунов при литье в песчаную и комбинированную формы / Е. И. Марукович, В. М. Ильюшенко, В. А. Пумпур [и др.] // Литейное производство. – 2019. – № 6. – С. 12–14.
7. Karantzalis, A. E. Microstructural Modifications of As-Cast High-Chromium White Iron by Heat Treatment / A. E. Karantzalis, A. Lekatou, H. Mavros // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2009. – Vol. 18 (2). – P. 174–181.
8. Structure refinement effect on two and three-body abrasion resistance of high chromium cast irons / J. J. Penagos, F. Onoa, E. Albertin, A. Sinatora // Wear. – 2015. – Vol. 340–341. – P. 19–24.
9. Suman, A. Microstructural Insights into Solid Particle Erosion in a High-Chromium Cast Iron / A. Suman, A. Fortini, N. Zanini // Metals. – 2025. – Vol. 15. – P. 6.
10. Enhanced Strength and Ductility of Chemically Heterogeneous Bainitic Steel Via Precipitation Strengthened Retained Austenite / Y. Fan, G. Gao, Z. Liu [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2025. – Vol. 56. – P. 784–792.
11. Dlouh, I. Chemical microheterogeneities as a strengthening factor in martensite of low alloyed steel / I. Dlouh // Scripta METALLURGICA et Materialia. – 1992. – Vol. 26. – P. 1581–1586.
12. Sidor, J. Quantitative Indicators of Microstructure and Texture Heterogeneity in Polycrystalline System / J. Sidor // Materials. – 2024. – Vol. 17. – P. 6057.
13. Rapid Prediction of Nonlinear Effective Properties of Complex Microstructure Lattice Materials / J. Yan, Z. Liu, H. Liu [et al.] // Materials. – 2025. – Vol. 18. – P. 1301.

Статья сдана в редакцию 17 июня 2025 года

Контакты:

yura_lebedinsky@mail.ru (Лебединский Юрий Анатольевич);
lcti@yandex.by (Дувалов Павел Юрьевич);
oprbru@mail.ru (Сухоцкий Сергей Александрович);
slavanski.new@gmail.com (Андриенко Вячеслав Михайлович).

Y. A. LEBEDINSKY, P. Y. DUVALOV, S. A. SUKHOTSKY, V. M. ANDRIENKO

EVALUATION OF MICROSTRUCTURE PARAMETERS OF NEAR-EUTECTIC HIGH-CHROMIUM CAST IRONS IN SAND MOLD CASTING

Abstract

Wear-resistant chromium cast irons, close in composition to the Fe–Cr–C eutectic, are widely used in industry. At the same time, their thermal and mechanical properties depend significantly on the microstructure, which can be quite diverse even within one casting. This research presents an attempt to automatically recognize geometric properties of the carbide fraction of cast iron, such as size distribution, orientation, and the relationship of these properties with the parameters of casting to be produced.

Keywords:

wear-resistant high chromium cast irons, wear-resistant chromium cast irons, eutectic, microstructure, properties of carbide fraction.

For citation:

Evaluation of microstructure parameters of near-eutectic high-chromium cast irons in sand mold casting / Y. A. Lebedinsky, P. Y. Duvalov, S. A. Sukhotsky, V. M. Andrienko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 3 (88). – P. 64–71.