



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-19-23>  
УДК 621.745.35

Поступила 10.07.2022  
Received 10.07.2022

## О МОДИФИЦИРОВАНИИ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ЧУГУНА

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Ассоциация литейщиков и металлургов,  
г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

А. В. СТЕЦЕНКО, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

*Показано, что элементарные кристаллические ячейки графита и основных продуктов модифицирования чугуна не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Модифицирующие элементы Al, Ca, Mg, Ba, Ce повышают межфазное натяжение расплав – графит, связывая поверхностно-активные кислород и серу. Модифицирование эвтектического графита чугуна является наноструктурным процессом, в котором модифицирующие элементы рафинируют элементарные нанокристаллы графита от адсорбированных атомов кислорода и серы. Это способствует увеличению концентрации центров кристаллизации графита при затвердевании расплава чугуна. Модифицирование снижает концентрацию растворенного водорода, что повышает эффективность модифицирующего эффекта. Снижение концентраций демодифицирующих поверхностно-активных элементов, дегазация расплава, увеличение теплоотвода способствуют повышению степени разветвленности и компактности дендритов графита при кристаллизации чугуна. Самым сильным модифицирующим элементом эвтектического графита чугуна является магний.*

**Ключевые слова.** Модифицирование, чугун, магний, эвтектический графит, нанокристаллы, кислород, сера, водород, адсорбция.

**Для цитирования.** Марукович, Е.И. О модифицировании эвтектического графита чугуна / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2022. № 4. С. 19-23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-19-23>.

## ON MODIFICATION OF EUTECTIC CAST IRON GRAPHITE

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Association of Foundrymen and Metallurgist of Belarus,  
Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

A. V. STETSENKO, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

*It has been shown that elementary crystalline cells of graphite and basic products of iron modification do not correspond to the principle of structural and dimensional correspondence of Dankov –Konobeevsky. Modifying elements Al, Ca, Mg, Ba, Ce increase the phase tension melt-graphite by binding surface-active oxygen and sulfur. Modifying cast iron eutectic graphite is a nanostructured process in which modifying elements refine elemental graphite nanocrystals from adsorbed oxygen and sulfur atoms. This contributes to an increase in the concentration of graphite nuclei upon solidification of the cast iron melt. The modification reduces the concentration of dissolved hydrogen, which increases the effectiveness of the modifying effect. Reduced concentrations of demodifying surface-active elements, melt degassing, increased heat removal contribute to increasing the degree of branching and compactness of graphite dendrites during iron crystallization. The strongest modifying element of eutectic cast iron graphite is magnesium.*

**Keywords.** Modification, cast iron, magnesium, eutectic graphite, nanocrystals, oxygen, sulfur, hydrogen, adsorption.

**For citation.** Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On modification of eutectic cast iron graphite. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp. 19-23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-19-23>.

Основными модификаторами эвтектического графита чугуна являются Al, Ca, Mg, Ba, Ce и сплавы, содержащие эти элементы. Принято считать, что они служат поверхностно-активными элементами (ПАЭ) или образуют центры кристаллизации (ЦК), которыми являются оксиды, сульфиды, нитриды [1, 2].

Экспериментально установлено, что Al, Ca, Mg, Ba, Ce и модифицирующие сплавы, содержащие эти элементы, повышают межфазное натяжение на границе расплав – графит при модифицировании эвтектического чугуна [3, 4]. Поэтому они не могут быть ПАЭ при его кристаллизации. Чтобы оксиды, сульфиды и нитриды Al, Ca, Mg, Ba, Ce были ЦК микрокристаллов графита, их элементарные кристаллические решетки должны удовлетворять принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского [5]. Согласно этому принципу, подложка может стать ЦК фазы, если они имеют однотипные элементарные кристаллические решетки, а их периоды отличаются не более чем на 8% [6].

Графит имеет гексагональную элементарную кристаллическую решетку [7]. Параметры элементарных кристаллических решеток основных продуктов модифицирования чугуна представлены в таблице, где периоды элементарных кристаллических решеток оксидов, сульфидов и нитридов обозначены символом  $a$ , а период элементарной кристаллической решетки графита –  $a_c$ .

Параметры элементарных кристаллических решеток графита и основных продуктов модифицирования чугуна [7–10]

Фаза	Тип элементарной кристаллической решетки	$a$ , нм	$\frac{\Delta a}{a_c}$ , %
Графит	Гексагональная	0,246	–
$\beta$ - $Al_2O_3$	Гексагональная	0,564	129
$SiO_2$	Гексагональная	0,346	41
CaO	Кубическая	0,480	95
BaO	Кубическая	0,554	125
MgO	Кубическая	0,421	71
$Ce_2O_3$	Кубическая	1,117	354
CaS	Кубическая	0,568	131
BaS	Кубическая	0,637	159
MgS	Кубическая	0,519	111
CeS	Кубическая	0,579	135
AlN	Гексагональная	0,311	26
CeN	Кубическая	0,502	104
$Mg_3N_2$	Кубическая	0,997	305
$Ca_3N_2$	Кубическая	1,142	364

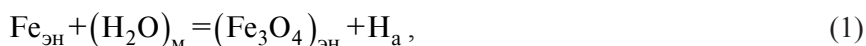
Из таблицы следует, что элементарные кристаллические решетки графита и основных продуктов модифицирования чугуна не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского. Следовательно, оксиды, нитриды и сульфиды Al, Ca, Mg, Ba, Ce не могут быть ЦК микроструктур эвтектического графита при затвердевании чугуна. Это подтверждено экспериментально при модифицировании его силикобарием [11].

Исходя из изложенного выше, возникает вопрос: какова роль Al, Ca, Mg, Ba, Ce при модифицировании эвтектического графита чугуна? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо исследовать процессы взаимодействия основных модификаторов эвтектического графита чугуна с расплавом и при его кристаллизации.

В эвтектическом чугуне содержится 17 ат. % углерода [12]. В таком, но жидком чугуне находятся 15,3 ат.% элементарных нанокристаллов графита и около 80 ат.% элементарных нанокристаллов железа [13]. В расплаве чугуна индукционной плавки содержатся 0,03–0,05 % серы и 0,003–0,005 % кислорода [14].

Установлено, что с повышением содержания углерода в расплавах железоуглеродистых сплавов концентрации в них кислорода и серы также увеличиваются [15, 16]. Это свидетельствует о том, что атомарные кислород и сера адсорбируются на элементарных нанокристаллах графита ( $C_{эн}$ ) жидкого чугуна. При этом стандартная теплота адсорбции атомов кислорода на графите составляет 335 кДж/моль [17]. Эта величина превышает стандартные теплоты образования FeO и CO [8, 18]. Поэтому адсорбированный на элементарных нанокристаллах графита атомарный кислород будет устойчив в жидком чугуне. Это относится и к адсорбированной атомарной сере.

Жидкий чугун активно реагирует с атмосферным воздухом, содержащим пары (молекулы) воды. Они взаимодействуют с элементарными нанокристаллами железа ( $Fe_{эн}$ ) с образованием атомарного водорода по следующей реакции:



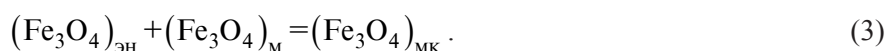
где  $(H_2O)_M$  – молекулы воды;  $(Fe_3O_4)_{эн}$  – элементарные нанокристаллы оксида железа;  $H_a$  – атомы водорода.

Кроме  $Fe_{эн}$ , в жидком чугуне присутствуют свободные атомы железа ( $Fe_a$ ) [12]. Они также реагируют с молекулами воды с образованием атомарного водорода:



где  $(Fe_3O_4)_M$  – молекулы оксида железа.

После (1) и (2) происходит реакция с образованием микрокристаллов оксида железа:

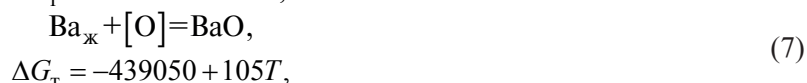


Атомарный водород, диффундируя в жидкий чугуна, не образует с  $\text{Fe}_a$  гидридов, но может адсорбироваться на  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ , так как выделяемая стандартная теплота адсорбции водорода на железе составляет 143 кДж/моль [19]. Поэтому атомарный водород может находиться в жидком чугуне в адсорбированном и свободном (растворенном) состояниях. Максимальная стандартная теплота адсорбции водорода на графите составляет всего 29 кДж/моль [20]. Это означает, что на нанокристаллах графита в основном будут адсорбироваться атомы кислорода и серы.

Затрачиваемая стандартная теплота диссоциации (атомизации) атмосферных молекул азота равна 947 кДж/моль [21], а максимальная выделяемая стандартная теплота адсорбции атомов азота на железе составляет 290 кДж/моль [19]. Поэтому азот в атомарном виде из атмосферного воздуха не может попасть в жидкий чугун, но с его компонентами образует нитриды [13, 18]. Их нанокристаллы и молекулы могут встраиваться в формирующиеся микрокристаллы аустенита, образуя так называемые «растворы внедрения».

При затвердевании чугуна адсорбированные кислород и сера препятствуют образованию ЦК микрокристаллов эвтектического графита, снижая их концентрацию. Это приводит к получению в чугунных отливках немодифицированной микроструктуры. Al, Ca, Mg, Ba, Ce, освобождая элементарные нанокристаллы графита от адсорбированных атомов кислорода и серы, способствуют образованию ЦК микрокристаллов эвтектического графита при затвердевании чугуна. Это приводит к повышению их концентрации и получению в чугунных отливках модифицированной микроструктуры. Доказательством такого действия Al, Ca, Mg, Ba, Ce является повышение межфазного натяжения на границе расплав – графит при модифицирующей обработке жидкого чугуна этими модификаторами [3, 4].

При их взаимодействии с растворенным кислородом расплава происходят следующие реакции, имеющие соответствующие энергии Гиббса, Дж/моль [16]:



При взаимодействии Al, Ca, Mg, Ba, Ce с адсорбированным на  $\text{C}_{\text{ЭН}}$  кислородом жидкого чугуна происходит следующая реакция:



где  $M$  – модификатор;  $\{\text{O}\}_C$  – кислород, адсорбированный на элементарных нанокристаллах графита;  $M_n\text{O}_m$  – оксид модификатора.

Реакцию (9) можно представить как сумму следующих реакций:



Тогда энергия Гиббса (9) будет равна сумме энергий Гиббса (10) и (11). Поскольку энергия Гиббса (11) при заданной температуре жидкого чугуна является величиной постоянной, то эффективность модификаторов будет определяться энергиями Гиббса реакций (4) – (8). Из них следует, что при равных концентрациях Al, Ca, Mg, Ba, Ce наиболее сильными модификаторами являются кальций и магний. Следует отметить, что предельная растворимость магния в жидком железе составляет 1 %, а кальция – 0,04 % [22].

Поэтому наиболее сильным модификатором эвтектического графита чугуна служит магний. Он также является самым эффективным раскислителем чугуна согласно реакциям (4) – (8).

По указанным выше причинам магний также служит самым активным десульфуратором чугуна, так как стандартные энергии Гиббса образования  $\text{CaS}$  и  $\text{MgS}$  соответственно равны  $-515$  и  $-390$  кДж/моль, т. е. отличаются друг от друга [22]. При этом стандартные энергии Гиббса образования  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  соответственно составляют  $-603$  и  $-570$  кДж/моль [22]. Они мало отличаются от соответствующих стандартных энергий Гиббса образования  $\text{CaS}$  и  $\text{MgS}$ . Это свидетельствует о том, что раскисляющая и десульфурующая способности магния примерно одинаковы.

При модифицировании эвтектического чугуна лигатурой  $\text{Ni-Mg}$  получали отливки с шаровидным графитом, содержащие  $0,09\%$  магния,  $0,004\%$  серы и  $7 \cdot 10^{-4}\%$  кислорода [4]. При этом в исходном эвтектическом чугуне с пластинчатым графитом до обработки лигатурой  $\text{Ni-Mg}$  содержалось  $0,02\%$  серы,  $35 \cdot 10^{-4}\%$  кислорода [4]. Таким образом, модифицирование эвтектического чугуна магнием снизило концентрацию серы и кислорода в 5 раз. Но если жидкий чугун выдерживать на воздухе, то в этом чугуне концентрация серы не изменяется, а концентрация кислорода повышается до  $18 \cdot 10^{-4}\%$ , что приводит к получению отливок с пластинчатым графитом [4]. Все это свидетельствует о том, что форма эвтектического графита существенно зависит от концентраций в жидком чугуне серы и кислорода, адсорбированных на элементарных нанокристаллах графита. Это подтверждается тем, что межфазное натяжение на границе расплав – графит для чугуна с шаровидным графитом существенно выше, чем у чугуна с пластинчатым графитом [3, 4].

Экспериментально установлено, что графит при затвердевании чугуна формируется в виде дендритов с разными разветвленностями ветвей, которые в основном имеют вид лепестков (пластин) [23, 24]. На степень разветвленности и компактности дендритов большое влияние оказывают пузырьки водорода, формирующиеся на их ветвях, ПАЭ и интенсивность теплоотвода [25]. Дегазируя расплав, связывая такие активные ПАЭ, как сера и кислород, модификаторы увеличивают степень разветвленности и компактности дендритов графита при эвтектической кристаллизации чугуна. Повышенная интенсивность теплоотвода увеличивает скорость затвердевания отливок. Она уменьшает демодифицирующие действия водорода, серы и кислорода, повышая концентрацию ЦК дендритов графита, делая их более разветвленными и компактными вплоть до получения шаровидных образований. Они получаются при использовании магния, который является самым сильным модифицирующим элементом для чугуна.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белов В. Д., Пикунов М. В., Тен Э. Б. и др. Литейное производство: учеб. М.: Издательский дом МИСиС, 2015. 487 с.
2. Шульте Г. Ю., Снежной Р. Л., Жуков А. А. и др. Активность, дезактивация и реактивация неметаллических включений как центров кристаллизации // Литейное производство. 1992. № 11. С. 3–6.
3. Кульбовский И. К., Богданов Р. А. Факторы, влияющие на структуру графита в отливках из чугуна // Metallurgia машиностроения. 2006. № 5. С. 19–21.
4. Мильман Б. С., Александров Н. Н., Соленков В. Т. и др. Межфазное натяжение и форма графита, кристаллизующегося в жидком чугуне // Литейное производство. 1976. № 5. С. 3–6.
5. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Модифицирование сплавов. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
6. Стеценко В. Ю. Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 60 с.
7. Свойства элементов: справ. / Под ред. М. Е. Дрица. М.: Metallurgia, 1985. 672 с.
8. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgia, 1978. 472 с.
9. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения: справ. М.: Metallurgia, 1976. 560 с.
10. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: справ. / Под ред. Т. Я. Косолаповой. М.: Metallurgia, 1985. 928 с.
11. Андреев В. В., Капустина Л. С. Роль активных элементов в повышении эффективности графитизирующих модификаторов // Литейное производство. 2006. № 4. С. 18–20.
12. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация чугунов // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 37–39.
13. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / Под ред. О. А. Банных и М. Е. Дрица. М.: Metallurgia, 1986. 440 с.
14. Шумихин В. С., Билецкий А. К. Физико-химические процессы электроплавки чугуна. Киев: Наукова думка, 1989. 168 с.
15. Жуховицкий А. А., Белашенко Д. К., Бокштейн Б. С. и др. Физико-химические основы металлургических процессов. М.: Metallurgia, 1973. 393 с.
16. Жуков А. А. О влиянии кислорода на растворимость углерода в жидком чугуне // Литейное производство. 1966. № 1. С. 24–28.
17. Вейлас С. Химическая кинетика и расчеты промышленных реакторов. М.: Химия, 1964. 432 с.
18. Кубашевский О., Оллокк С. Б. Металлургическая термодинамика. М.: Metallurgia, 1982. 290 с.



19. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. М.: Metallurgiya, 1987. 368 с.
20. Фомкин А. А., Прибылов А. А., Мурдмаа К. О. и др. Адсорбция водорода в микропористых углеродных адсорбентах различного генезиса // Физикохимия поверхности и защиты материалов. 2019. Т. 55. № 3. С. 227–233.
21. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgiya, 1976. 600 с.
22. Голубцов В. А., Лунев В. В. Модифицирование стали для отливок и слитков. Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. 356 с.
23. Захарченко Э. В., Левченко Ю. Н., Горенко В. Г. и др. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. Киев: Наукова думка, 1986. 248 с.
24. Михайлов А. М., Воробьев А. П. О механизме и движущих силах сфероидизации графита // Изв. выс. учеб. завед. Черная металлургия. 1988. № 11. С. 104–111.
25. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Кристаллизация металлов – наноструктурный процесс // Металлургия машиностроения. 2021. № 4. С. 28–30.

## REFERENCES

1. Belov V. D., Pikunov M. V., Ten E. B. et al. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry. Textbook]. Moscow, Izdatel'skij dom MISiS Publ., 2015, 487 p.
2. Shul'te G. Yu., Snezhnoj R. L., Zhukov A. A. et al. Aktivnost', dezaktivaciya i reaktivaciya nemetallicheskih vlyuchenij kak centrov kristallizacii [Activity, decontamination and reactivation of non-metallic inclusions as nuclei of crystallization]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1992, no. 11, pp. 3–6.
3. Kul'bovskij I. K., Bogdanov R. A. Faktory, vliyayushchie na strukturu grafita v otlivkah iz chuguna [Factors affecting the structure of graphite in cast iron castings]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2006, no. 5, pp. 19–21.
4. Mil'man B. S., Aleksandrov N. N., Solenkov V. T. Mezhfaznoe natyazhenie i forma grafita, kristallizuyushchegosya v zhidkom chugune [Interphase tension and shape of graphite crystallizing in liquid iron]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1976, no. 5, pp. 3–6.
5. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Modificirovanie splavov* [Modification of alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009, 192 p.
6. Stetsenko V. Yu. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoy invertirovannoj strukturoj. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological bases for production of blanks of increased wear resistance from silumins with highly dispersed inverted structure. Autor. diss. Dr. technical sciences]. BNTU Publ., Minsk, 2021, 60 p.
7. Drica M. E. *Svojstva elementov* [Item Properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 672 p.
8. Samsonov G. V. *Fiziko-himicheskie svojstva oksidov* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
9. Samsonov G. V., Vinnickij I. M. *Tugoplavkie soedineniya* [Refractory compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 560 p.
10. Kosolapovoj T. Ya. *Svojstva, poluchenie i primenenie tugoplavkih soedinenij* [Properties, Production and Application of Refractory Compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 928 p.
11. Andreev V. V., Kapustina L. S. Rol' aktivnyh elementov v povyshenii effektivnosti grafitiziruyushchih modifikatorov [Role of active elements in increasing efficiency of graphitizing modifiers]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2006, no. 4, pp. 18–20.
12. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostrukturnaya kristallizaciya chugunov [Nanostructured crystallization of cast iron]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 37–39.
13. Bannyh O. A., Drica M. E. *Diagrammy sostoyaniya dvojnij i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza* [Hardware-based Dual and Multicomponent State Diagrams]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
14. Shumihin V. S., Bileckij A. K. *Fiziko-himicheskie processy elektroplavki chuguna* [Physical and chemical processes of electric smelting of cast iron]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989, 168 p.
15. Zhuhovickij A. A., Belashchenko D. K., Bokshtejn B. S. *Fiziko-himicheskie osnovy metallurgicheskikh processov* [Physicochemical bases of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973, 393 p.
16. Zhukov A. A. O vliyanii kisloroda na rastvorimost' ugleroda v zhidkom chugune [On the effect of oxygen on the solubility of carbon in liquid iron]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1966, no. 1, pp. 24–28.
17. Vejlas S. *Himicheskaya kinetika i raschety promyshlennyh reaktorov* [Chemical kinetics and calculations of industrial reactors]. Moscow, Himiya Publ., 1964, 432 p.
18. Kubashevskij O., Olkock S. B. *Metallurgicheskaya termohimiya* [Metallurgical thermochemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 290 p.
19. Kolacheva B. A., Levinskogo Yu. V. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
20. Fomkin A. A., Pribylov A. A., Murdmaa K. O. Adsorbciya vodoroda v mikroporistyh uglerodnyh adsorbentah razlichnogo genезisa [Hydrogen adsorption in microporous carbon adsorbents of different genesis]. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchity materialov = Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 227–233.
21. Samsonov G. V. *Svojstva elementov. Fizicheskie svojstva* [Properties of elements. Part 1. Physical Properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
22. Golubcov V. A., Lunev V. V. *Modificirovanie stali dlya otlivok i slitkov* [Steel modification for castings and ingots]. Chelyabinsk = Zaporozhye, ZNTU Publ., 2009, 356 p.
23. Zaharchenko E. V., Levchenko Yu. N., Gorenko V. G. et al. *Otlivki iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom* [Cast iron castings with spherical and vermicular graphite]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1986, 248 p.
24. Mihajlov A. M., Vorob'ev A. P. O mekhanizme i dvizhushchih silah sferoidizacii grafita [On the mechanism and driving forces of graphite spheroidization]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya = Proceedings of universities. Ferrous metallurgy*, 1988, no. 11, pp. 104–111.
25. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Kristallizaciya metallov – nanostrukturnyj process [Metal crystallization – nanostructural process]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2021, no. 4, pp. 28–30.