



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-34-39>
УДК 621.745.35

Поступила 23.12.2024
Received 23.12.2024

О КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АУСТЕНИТНО-КАРБИДНОЙ ЭВТЕКТИКИ ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ

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

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

Кристаллизация аустенитно-карбидной эвтектики хромистых чугунов – это наноструктурный процесс, в котором основную роль играют нанокристаллы железа, графита и хрома. Дендритные микрокристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке γ -Fe. При кристаллизации хромистых чугунов атомы кислорода и водорода в их расплавах являются демодифицирующими элементами, снижающими дисперсность микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида. Молекулярный водород, выделяющийся на дендритных микрокристаллах эвтектических аустенита и карбида, препятствует разветвлению дендритов. Это приводит к демодифицированию структуры аустенитно-карбидной эвтектики хромистых чугунов. Модифицирующие элементы хромистых чугунов уменьшают в их расплавах концентрации атомов кислорода и водорода, что повышает дисперсность и разветвленность дендритных микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида при затвердевании хромистых чугунов. Неметаллические включения модифицирующих элементов (Mg, Ca, Ce, La) хромистых чугунов не могут быть центрами кристаллизации микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида. Этими центрами кристаллизации являются наноструктурные образования аустенита и карбида.

Ключевые слова. Хромистые чугуны, кристаллизация, эвтектика, нанокристаллы, водород, кислород, карбид, аустенит.
Для цитирования. Марукович, Е.И. О кристаллизации аустенитно-карбидной эвтектики хромистых чугунов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-34-39>.

ON THE CRYSTALLIZATION OF AUSTENITIC CARBIDE EUTECTIC OF CHROMIUM CAST IRON

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

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

Crystallization of austenitic carbide eutectic of chromium cast iron is a nanostructural process in which iron, graphite and chromium nanocrystals play a major role. Austenite dendritic microcrystals are not solid solutions of carbon and chromium atoms in the γ -Fe crystal lattice. During the crystallization of chromium cast iron, oxygen and hydrogen atoms in their melts are demodifying elements that reduce the dispersion of microcrystals of eutectic austenite and carbide. Molecular hydrogen released on dendritic microcrystals of eutectic austenite and carbide prevents the branching of dendrites. This leads to demodification of the austenitic-carbide eutectic structure of chromium cast irons. Modifying elements of chromium cast iron reduce the concentrations of oxygen and hydrogen atoms in their melts. This increases the dispersion and branching of dendritic microcrystals of eutectic austenite and carbide during solidification of chromium cast iron. Nonmetallic inclusions of modifying elements (Mg, Ca, Ce, La) of chromium cast irons cannot be centers of crystallization of microcrystals of eutectic austenite and carbide. These crystallization centers are nanostructured formations of austenite and carbide.

Keywords. Chromium cast iron, crystallization, eutectic, nanocrystals, hydrogen, oxygen, carbide, austenite.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On the crystallization of austenitic carbide eutectic of chromium cast iron. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 34–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-34-39>.

Среди легированных чугунов большое применение получили хромистые чугуны. Они кристаллизуются с образованием аустенитно-карбидной эвтектики (АКЭ) [1]. Основными элементами АКЭ являются железо, углерод и хром. Из литературных источников известно, что микрокристаллы аустенита хромистых чугунов являются твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке γ -Fe [1–6]. Основной недостаток хромистых чугунов – образование при кристаллизации их расплавов

крупнокристаллической эвтектической структуры, которая существенно снижает механические свойства отливок. Для модифицирования АКЭ в основном используют лигатуры, содержащие Се, La, Ca, Mg [6, 7]. Известно, что модифицирующие элементы чугунов образуют неметаллические включения (НВ), которые служат центрами кристаллизации (ЦК) основных фаз [1–5].

Хромистые чугуны можно получить, растворив в жидком железе графит и хром. Теплота плавления железа составляет 13,8 кДж/моль, а теплота его атомизации – 418,3 кДж/моль [8]. При плавлении железа атомизируется всего 3,3 % его ионов, в результате микрокристаллы железа распадаются на нанокристаллы [9].

Теплота растворения графита в жидком железе равна 71,3 кДж/моль [10], теплота атомизации графита – 716,1 кДж/моль [8]. Тогда при растворении графита в жидком железе атомизируется только 10 % связанных атомов углерода, в результате микрокристаллы графита распадаются на его нанокристаллы.

Теплота плавления хрома составляет 13,8 кДж/моль, а теплота его атомизации – 397,2 кДж/моль [8]. При плавлении (растворении в жидком железе) хрома атомизируется всего 3,5 % его ионов, в результате микрокристаллы хрома распадаются на его нанокристаллы [9].

При кристаллизации АКЭ хромистых чугунов из расплавов (L) выделяются микрокристаллы (m_c) аустенита (A_{mc}) и микрокристаллы карбида (CB_{mc}) по реакции:

$$L = A_{mc} + CB_{mc} \quad (1)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией металлов и сплавов механизм кристаллизации A_{mc} можно представить следующим образом [9, 11, 12]. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы (sn) аустенита (A_{sn}) согласно реакции:

$$Fe_{n1} + C_{n1} + Cr_{n1} + Fe_{a1} + C_{a1} + Cr_{a1} = A_{sn}, \quad (2)$$

где Fe_{n1} , C_{n1} , Cr_{n1} – нанокристаллы железа, графита, хрома; Fe_{a1} , C_{a1} , Cr_{a1} – атомы железа, углерода, хрома при реакции (1) для получения A_{mc} .

Затем формируются ЦК (cc) аустенита (A_{cc}) по реакции:

$$A_{sn} + Fe_{a1} + C_{a1} + Cr_{a1} = A_{cc}. \quad (3)$$

Заканчивается процесс кристаллизации A_{mc} по следующей реакции:

$$A_{cc} + A_{sn} + Fe_{a1} + C_{a1} + Cr_{a1} = A_{mc}. \quad (4)$$

Дендритные микрокристаллы аустенита образуются путем соединения нанокристаллов посредством атомов [11]. По аналогии с наноструктурной кристаллизацией металлов и сплавов механизм кристаллизации CB_{mc} можно представить следующим образом [9, 11, 12]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы карбида (CB_{sn}) согласно реакции:

$$Fe_{n2} + C_{n2} + Cr_{n2} + Fe_{a2} + C_{a2} + Cr_{a2} = CB_{sn}, \quad (5)$$

где Fe_{n2} , C_{n2} , Cr_{n2} – нанокристаллы железа, графита, хрома; Fe_{a2} , C_{a2} , Cr_{a2} – атомы железа, углерода, хрома при реакции (1) для получения CB_{mc} .

Затем образуются ЦК карбида (CB_{cc}) по реакции:

$$CB_{sn} + Fe_{a2} + C_{a2} + Cr_{a2} = CB_{cc}. \quad (6)$$

Заканчивается процесс кристаллизации CB_{mc} по следующей реакции:

$$CB_{cc} + CB_{sn} + Fe_{a2} + C_{a2} + Cr_{a2} = CB_{mc}. \quad (7)$$

Дендритные микрокристаллы карбида формируются путем соединения нанокристаллов посредством атомов [11]. Эвтектическими карбидами при кристаллизации хромистых чугунов являются Fe_3C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, в которые встраиваются нанокристаллы железа.

Из реакций (2) – (7) следует, что структура АКЭ хромистых чугунов будет определяться концентрациями A_{cc} и CB_{cc} . Чем выше эти концентрации, тем более дисперсной становится структура АКЭ. Из реакций (2) – (7) также следует, что микрокристаллы аустенита хромистых чугунов не могут быть твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке γ -Fe.

На кристаллизацию эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов большое влияние будут оказывать атомы водорода. Они формируются при взаимодействии молекул воды атмосферного воздуха с нанокристаллами и атомами железа и хрома в расплавах хромистых чугунов [13]. В этих расплавах атомы водорода находятся в свободном (растворенном) и адсорбированном состояниях. Стандартные теплоты адсорбции атомов водорода на железе и хrome составляют соответственно 143

и 161 кДж/моль [14]. При этом они не образуют твердые растворы внедрения [15]. Между адсорбированным водородом $\{H\}$ и растворенным водородом устанавливается равновесие по закону Генри [16]:

$$\{H\} = k_1 [H], \quad (8)$$

где k_1 – константа Генри.

В расплавах хромистых чугунов концентрация адсорбированного водорода пропорциональна концентрации растворенного водорода. На кристаллизацию эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов большое влияние будут оказывать атомы кислорода. Они образуются при диссоциации молекулярного кислорода атмосферного воздуха на нанокристаллах железа и хрома в расплавах хромистых чугунов [13]. В этих расплавах атомы кислорода будут находиться в растворенном и адсорбированном состояниях. Стандартные теплоты адсорбции атомов кислорода на железе и хrome составляют соответственно 570 и 729 кДж/моль [14]. Адсорбируясь на нанокристаллах железа и хрома в расплавах хромистых чугунов, атомы кислорода не будут вступать в реакции с этими нанокристаллами, поскольку стандартные теплоты адсорбции атомарного кислорода на железе и хrome больше стандартных теплот образования FeO (265 кДж/моль) и CrO (389 кДж/моль) [17]. При этом атомы кислорода не образуют твердые растворы внедрения с нанокристаллами железа и хрома [15]. Между адсорбированным кислородом $\{O\}$ и растворенным кислородом устанавливается равновесие по закону Генри [16]:

$$\{O\} = k_2 [O], \quad (9)$$

где k_2 – константа Генри.

В расплавах хромистых чугунов концентрация адсорбированного кислорода пропорциональна концентрации растворенного кислорода. В хромистых чугунах содержится достаточное количество атомов хрома, которые являются хорошими раскислителями. Эти атомы снижают в расплаве стали концентрацию растворенного кислорода. Соответственно, согласно уравнению (9), будет уменьшаться и концентрация адсорбированного кислорода. Это снижает поверхностную активность атомарного кислорода на нанокристаллах железа и хрома и делает ее сравнимой с аналогичной поверхностной активностью атомарного водорода в расплавах хромистых чугунов.

Стандартная теплота диссоциации молекул азота атмосферного воздуха составляет 947 кДж/моль на молекулярный азот, или 473,5 кДж/моль на атомарный азот [8]. Стандартные теплоты адсорбции атомов азота на железе и хrome составляют соответственно 290 и 440 кДж/моль [14]. Поэтому молекулы азота не будут диссоциировать на атомы при взаимодействии с нанокристаллами железа и хрома в расплавах хромистых чугунов. Азот с этими чугунами может образовывать только нитриды железа и хрома.

Адсорбируясь на нанокристаллах железа и хрома, атомы водорода и кислорода препятствуют объединению нанокристаллов в ЦК эвтектических аустенита и карбида, что приводит к уменьшению их концентрации и укрупнению структуры АКЭ при затвердевании отливок. Адсорбированные водород и кислород оказывают демодифицирующее действие на микрокристаллы эвтектических аустенита и карбида, снижая их дисперсность при кристаллизации хромистых чугунов. Согласно уравнениям (8)–(9), для измельчения структуры АКЭ хромистых чугунов необходимо снизить в их расплавах концентрации растворенных атомов кислорода и водорода.

На кристаллизацию эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов большое влияние будет оказывать молекулярный водород. Выделяясь на ветвях дендритных микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида, молекулярный водород препятствует их разветвлению, что приводит к образованию крупных дендритных ветвей и большой неоднородности структуры отливок.

Модификаторы хромистых чугунов, содержащие Ce, La, Ca, Mg, снижают концентрации растворенных в расплавах атомов кислорода и водорода [6, 7]. Это приводит к модифицированию микрокристаллов аустенита и карбида АКЭ при затвердевании отливок.

При обработке расплавов хромистых чугунов модификаторами дегазация по водороду происходит в основном за счет эффективной адсорбции атомарного водорода соединениями модифицирующих элементов (Mg, Ca, Ce, La), которые являются не только сильными раскислителями, но и активными гидридообразователями [18].

Чтобы НВ (оксиды, карбиды, нитриды, сульфиды, оксисульфиды) на основах Ce, La, Ca, Mg были ЦК микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов, необходимо, чтобы НВ с аустенитом и карбидом имели одинаковый тип кристаллических решеток, а отличия соответствующих

параметров их решеток не должны превышать 8–9%, т. е. необходимо соблюдение принципа структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского [3, 19].

Аустенит и карбид Cr_{23}C_6 АКЭ хромистых чугунов имеют кубические кристаллические решетки с параметрами $a = 0,364$ и $1,066$ нм соответственно [20]. Чтобы НВ модифицирующих элементов были ЦК микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида Cr_{23}C_6 , необходимо, чтобы эти НВ имели кубические кристаллические решетки с параметрами a в диапазоне от $0,331$ до $0,397$ нм для аустенита и от $0,970$ до $1,162$ нм для карбида Cr_{23}C_6 . Кубические кристаллические решетки имеют следующие НВ: MgO ($a = 0,421$ нм); MgS ($a = 0,519$ нм); Mg_3N_2 ($a = 0,995$ нм); CaO ($a = 0,481$ нм); CaS ($a = 0,568$ нм); CeS ($a = 0,578$ нм); CeN ($a = 0,502$ нм); LaS ($a = 0,584$ нм); LaN ($a = 0,528$ нм) [20]. Из этого следует, что НВ модифицирующих элементов хромистых чугунов не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского в отношении эвтектических аустенита и карбида Cr_{23}C_6 , поэтому не могут быть ЦК их микрокристаллов.

Карбид Fe_3C хромистых чугунов имеет ромбическую кристаллическую решетку [20]. Такой решеткой не обладают НВ модифицирующих элементов (Mg , Ca , Ce , La) хромистых чугунов [20]. Такие НВ не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского в отношении карбида Fe_3C , поэтому не могут быть ЦК его микрокристаллов.

Карбид Cr_7C_3 хромистых чугунов имеет гексагональную кристаллическую решетку с параметром $a = 1,398$ нм [20]. Гексагональной кристаллической решеткой обладают следующие НВ модифицирующих элементов хромистых чугунов: Mg_2C_3 ($a = 0,745$ нм); Ca_3N_2 ($a = 0,355$ нм); $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ ($a = 0,403$ нм) [20]. Такие НВ не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского в отношении карбида Cr_7C_3 , поэтому не могут быть ЦК его микрокристаллов.

ЦК микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида хромистых чугунов являются соответственно A_{cc} и CB_{cc} , которые имеют одинаковые с аустенитом и карбидом по типу и параметрам кристаллические решетки, соответствующие принципу структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского.

Механизм действия модифицирующих элементов хромистых чугунов заключается в уменьшении демодифицирующего влияния на структуру АКЭ растворенных в расплаве кислорода, водорода и повышении интенсивности объединения нанокристаллов в ЦК микрокристаллов аустенита и карбида. Основным недостатком модифицирующих элементов хромистых чугунов является существование критических концентраций этих элементов. При их превышении уменьшаются концентрации ЦК, что приводит к демодифицирующему эффекту. Поэтому концентрации модифицирующих элементов в расплавах хромистых чугунов должны быть оптимальными. Уменьшение концентраций растворенных в расплавах хромистых чугунов водорода и кислорода и поддержание их оптимальных значений является эффективным способом модифицирования структуры отливок.

Выводы

1. Кристаллизация АКЭ хромистых чугунов является наноструктурным процессом, в котором нанокристаллы железа, графита, хрома, соединяясь атомами железа, углерода, хрома, образуют дендритные микрокристаллы аустенита и карбида. Причем микрокристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов углерода и хрома в кристаллической решетке $\gamma\text{-Fe}$.

2. На кристаллизацию АКЭ хромистых чугунов большое влияние оказывают растворенные в их расплавах атомы кислорода и водорода. Они являются демодифицирующими элементами, снижающими дисперсность эвтектических микрокристаллов аустенита и карбида.

3. На кристаллизацию АКЭ хромистых чугунов большое влияние оказывает выделяющийся на ветвях дендритных микрокристаллов аустенита и карбида молекулярный водород. Он препятствует разветвлениям дендритов, способствуя демодифицированию структуры АКЭ.

4. Модифицирующие элементы хромистых чугунов уменьшают в их расплавах концентрации атомов кислорода и водорода, повышая интенсивность объединения нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов эвтектических аустенита и карбида. Но концентрации модифицирующих элементов в расплавах хромистых чугунов должны быть оптимальными.

5. Неметаллические включения модифицирующих элементов (Mg , Ca , Ce , La) хромистых чугунов не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского в отношении эвтектических аустенита и карбида. Поэтому эти неметаллические включения не могут быть центрами кристаллизации микрокристаллов АКЭ.

6. Центрами кристаллизации микрокристаллов АКЭ при затвердевании хромистых чугунов являются A_{cc} и CB_{cc} , которые имеют одинаковые кристаллические решетки с аустенитом и карбидом, т. е. соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гиришова. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
2. **Лившиц, Б.Г.** Металлография: учебник для вузов / Б.Г. Лившиц. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
3. **Лахтин, Ю.М.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
4. Металловедение. Т. 1. / И.И. Новиков [и др.]. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 496 с.
5. **Солнцев, Ю.П.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин – СПб.: Химиздат, 2017. – 784 с.
6. Абразивостойкие высокохромистые чугуны / В.П. Гаврилюк [и др.]. – Луганск: Ноулидж, 2010. – 141 с.
7. Управление структурой и свойствами хромистых белых чугунов путем их модифицирования / Ри Хосен [и др.]. // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. – № 6. – С. 412–416.
8. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
9. **Марукович, Е.И.** Наноструктурная теория металлических расплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
10. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
11. **Марукович, Е.И.** Наноструктурная кристаллизация металлов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2021. – № 2. – С. 23–26.
12. Механизм сохранения структурной информации силуминов в системе «твердое – жидкое – твердое» / Е.И. Марукович [и др.]. // Цветные металлы. – 2024. – № 11. – С. 76–81.
13. **Марукович, Е.И.** Влияние газов на кристаллизацию жаропрочных хромистых сталей / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 13–16.
14. Константы взаимодействия металлов с газами: справ. / Под ред. Б.А. Колачева и Ю.В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
15. **Марукович, Е.И.** О растворимости газов в жидких литейных сплавах / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2023. – № 1. – С. 32–34.
16. **Жуховицкий, А.А.** Физическая химия / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман – М.: Металлургия, 2001. – 688 с.
17. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
18. **Антонова, М.М.** Свойства гидридов металлов: справ. / М.М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 128 с.
19. **Стеценко, В.Ю.** Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Ю. Стеценко. – Минск: БНТУ, 2021. – 60 с.
20. Справочник химика. – Л.: Химия, 1971. – Т. 1. – 1072 с.

REFERENCES

1. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* [Cast Iron Casting Handbook]. Pod red. N.G. Girshovicha. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978, 758 p.
2. **Livshic B.G.** *Metallografiya: uchebnik dlya vuzov* [Metallography: textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 336 p.
3. **Lahtin Yu. M., Leont'eva V.P.** *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
4. **Novikov I.I., Zolotorevskij V.S., Portnoj V.K. et al.** *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow, Izdatel'skij Dom MISiS Publ., 2009, vol. 1, 496 p.
5. **Solncev Yu. P., Pryahin E.I.** *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Saint-Petersburg, Himizdat Publ., 2017, 784 p.
6. **Gavrilyuk V.P., Tihonovich V.I., SHalevskaya I. A. et al.** *Abrazivostojkie vysokohromistye chuguny* [Abrasive resistant high chromium cast irons]. Lugansk, Noulidzh Publ., 2010, 141 p.
7. **Ri Hosen, Dzyuba G.S., Ri E.H. et al.** Управление структурой и свойствами хромистых белых чугунов путем их модифицирования [Control of structure and properties of chrome white cast irons by their modification]. *Izvest. vyssh. uchebn. zaved. Chernaya metallurgiya = Proceedings of high schools Ferrous metallurgy*, 2015, vol. 58, no. 6, pp. 412–416.
8. *Svojstva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svojstva. Spravochnik* [Properties of elements. Part 1. Physical properties. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
9. **Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu.** Наноструктурная теория металлических расплавов [Nanostructural theory of metallic melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
10. **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]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986, 248 p.
11. **Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A.V.** Наноструктурная кристаллизация металлов [Nanostructured metal crystallization]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
12. **Marukovich E.I., Nikitin K.V., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A.V.** Механизм сохранения структурной информации силуминов в системе «твердое – жидкое – твердое» [Mechanism to preserve silumins structural information in the “solid – liquid – solid” system]. *Cvetnye metally = Tsvetnye Metally*, 2024, no. 11, pp. 76–81.

13. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Vliyanie gazov na kristallizaciyu zharoprochnykh hromistykh stalej [Influence of gases on crystallization of heat-resistant chromium steels]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 13–16.
14. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami: spravochnik* [Constants of interaction of metals with gases: reference book]. Pod red. B. A. Kolacheva i Yu. V. Levinskogo. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
15. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** O rastvorimosti gazov v zhidkih litejnykh splavah [On solubility of gases in liquid casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 32–34.
16. **Zhuhovickij A. A., Shvarcman L. A.** *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
17. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov: spravochnik* [Physico-chemical properties of oxides: reference book]. Pod red. G. V. Samsonova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
18. **Antonova M. M.** *Svoystva gidridov metallov: spravochnik* [Properties of metal hydrides: reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
19. **Stetsenko V. Yu.** *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoj invertirovannoj strukturoj: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Theoretical and technological foundations of obtaining billets of increased wear resistance from silumins with a highly dispersed inverted structure: autoref. dis... Dr. tech. sciences]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 60 p.
20. *Spravochnik himika* [Chemist's Handbook]. Leningrad, Himiya Publ., 1971, vol. 1, 1072 p.