



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-40-45>
УДК 621.745.35

Поступила 18.02.2025
Received 18.02.2025

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СЕРЫХ 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 серых чугунов – наноструктурный процесс, в котором основную роль играют нанокристаллы железа, кремния и графита. Микрорекристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов кремния и углерода в кристаллической решетке γ -Fe. При кристаллизации серых чугунов атомы кислорода и водорода выступают демодифицирующими элементами структуры аустенита, а атомы кислорода, водорода и серы – демодифицирующими элементами структуры графита. Молекулярный водород, выделяющийся на дендритных микрорекристаллах аустенита, препятствует их разветвлению, способствуя демодифицированию структуры аустенита. Модифицирующие элементы серых чугунов уменьшают в расплавах концентрации демодифицирующих элементов, способствуя формированию разветвленных дендритных микрорекристаллов графита.

Ключевые слова. Серые чугуны, кристаллизация, нанокристаллы, кислород, водород, сера, графит, аустенит.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Кристаллизация серых чугунов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 40–45. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-40-45>.

CRYSTALLIZATION OF GRAY CAST IRONS

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 gray cast irons is a nanostructured process in which nanocrystals of iron, silicon and graphite play a major role. Austenite microcrystals are not solid solutions of silicon and carbon atoms in the γ -Fe crystal lattice. In the crystallization of gray cast irons, oxygen and hydrogen atoms are demodifying elements of the austenite structure. In the crystallization of gray cast irons, oxygen, hydrogen and sulfur atoms are demodifying elements of the graphite structure. Molecular hydrogen released on dendritic austenite microcrystals prevents their branching, contributing to the demodification of the austenite structure. The modifying elements of gray cast irons reduce the concentrations of demodifying elements in the melts, contributing to the formation of branched dendritic graphite microcrystals.

Keywords. Gray cast irons, crystallization, nanocrystals, oxygen, hydrogen, sulfur, graphite, austenite.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Crystallization of gray cast irons. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 2, pp. 40–45. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-40-45>.

В литейном производстве наибольшее распространение получили серые чугуны (СЧ). Они кристаллизуются с образованием аустенитно-графитной эвтектики (АГЭ). Для предотвращения отбела СЧ содержат 1,5–3,0% кремния [1]. В зависимости от формы микрорекристаллов эвтектического графита (графита) различают чугуны с пластинчатым графитом (ЧПГ) и чугуны с шаровидным графитом (ЧШГ). Последние получают путем обработки расплавов ЧПГ магнием или лигатурами, содержащими магний. Он является основным сфероидизирующим элементом при производстве ЧШГ. Для кристаллизации шаровидной формы графита содержание магния в ЧШГ должно составлять 0,04–0,08% [1]. Из литературных источников известно, что микрорекристаллы аустенита в СЧ являются твердыми растворами атомов углерода и кремния в кристаллической решетке γ -Fe [1–5].

СЧ можно получить, растворив в жидком железе графит и кремний. Теплота плавления железа составляет 13,8 кДж/моль, а теплота его атомизации – 418,3 кДж/моль [6]. При плавлении железа атомизируется 3,3% его ионов, в результате микрорекристаллы железа распадаются на нанокристаллы [7].

Теплота растворения графита в жидком железе составляет 71,3 кДж/моль [8], теплота атомизации графита – 716,1 кДж/моль [6]. При растворении графита в жидком железе атомизируется только 10% связанных атомов углерода, в результате микрорекристаллы графита распадаются на нанокристаллы [7].

Теплота растворения кремния в расплаве СЧ в среднем равна 78,0 кДж/моль [5], теплота атомизации кремния – 469,3 кДж/моль [6]. При растворении кремния в жидком СЧ атомизируется в среднем 16,6% связанного кремния, в результате микрокристаллы кремния распадаются на нанокристаллы [7].

Цель настоящей работы – определение механизмов наноструктурной кристаллизации СЧ.

При кристаллизации СЧ в интервале ликвидус – солидус из исходного расплава (L) выделяются микрокристаллы первичного аустенита ($A_{\text{МКП}}$) и образуется расплав эвтектического состава (L_3) согласно следующей реакции:

$$L = A_{\text{МКП}} + L_3. \quad (1)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией металлов и сплавов механизм кристаллизации $A_{\text{МКП}}$ можно представить следующим образом [9, 10]. Сначала появляются структурообразующие нанокристаллы первичного аустенита ($A_{\text{СНП}}$) по реакции:

$$\text{Fe}_{\text{ЭН1}} + \text{C}_{\text{ЭН1}} + \text{Si}_{\text{ЭН1}} + \text{Fe}_{\text{a1}} + \text{C}_{\text{a1}} + \text{Si}_{\text{a1}} = A_{\text{СНП}}, \quad (2)$$

где $\text{Fe}_{\text{ЭН1}}$, $\text{C}_{\text{ЭН1}}$, $\text{Si}_{\text{ЭН1}}$ – элементарные нанокристаллы железа, графита, кремния соответственно; Fe_{a1} , C_{a1} , Si_{a1} – атомы железа, углерода, кремния при реакции (1) для получения $A_{\text{МКП}}$.

Затем формируются центры кристаллизации (ЦК) первичного аустенита ($A_{\text{ЦКП}}$):

$$A_{\text{СНП}} + \text{Fe}_{\text{a1}} + \text{C}_{\text{a1}} + \text{Si}_{\text{a1}} = A_{\text{ЦКП}}. \quad (3)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $A_{\text{МКП}}$ реакцией:

$$A_{\text{ЦКП}} + A_{\text{СНП}} + \text{Fe}_{\text{a1}} + \text{C}_{\text{a1}} + \text{Si}_{\text{a1}} = A_{\text{МКП}}. \quad (4)$$

При кристаллизации АГЭ СЧ из L_3 выделяются микрокристаллы эвтектического аустенита ($A_{\text{МКЭ}}$) и микрокристаллы графита ($C_{\text{МК}}$) по реакции:

$$L_3 = A_{\text{МКЭ}} + C_{\text{МК}}. \quad (5)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией $A_{\text{МКП}}$ механизм кристаллизации $A_{\text{МКЭ}}$ можно представить следующим образом. Сначала появляются структурообразующие нанокристаллы эвтектического аустенита ($A_{\text{СНЭ}}$):

$$\text{Fe}_{\text{ЭН2}} + \text{C}_{\text{ЭН2}} + \text{Si}_{\text{ЭН2}} + \text{Fe}_{\text{a2}} + \text{C}_{\text{a2}} + \text{Si}_{\text{a2}} = A_{\text{СНЭ}}, \quad (6)$$

где $\text{Fe}_{\text{ЭН2}}$, $\text{C}_{\text{ЭН2}}$, $\text{Si}_{\text{ЭН2}}$ – элементарные нанокристаллы железа, графита, кремния соответственно; Fe_{a2} , C_{a2} , Si_{a2} – атомы железа, углерода, кремния при реакции (5) для получения $A_{\text{МКЭ}}$.

Затем формируются ЦК эвтектического аустенита ($A_{\text{ЦКЭ}}$):

$$A_{\text{СНЭ}} + \text{Fe}_{\text{a2}} + \text{C}_{\text{a2}} + \text{Si}_{\text{a2}} = A_{\text{ЦКЭ}}. \quad (7)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $A_{\text{МКЭ}}$ реакцией:

$$A_{\text{ЦКЭ}} + A_{\text{СНЭ}} + \text{Fe}_{\text{a2}} + \text{C}_{\text{a2}} + \text{Si}_{\text{a2}} = A_{\text{МКЭ}}. \quad (8)$$

По аналогии с наноструктурной кристаллизацией $A_{\text{МКЭ}}$ механизм кристаллизации $C_{\text{МК}}$ можно представить следующим образом. Сначала появляются структурообразующие нанокристаллы графита ($C_{\text{СН}}$):

$$C_{\text{ЭН3}} + C_{\text{a3}} = C_{\text{СН}}, \quad (9)$$

где $C_{\text{ЭН3}}$ – элементарные нанокристаллы графита; C_{a3} – атомы углерода при реакции (5) для получения $C_{\text{МК}}$.

Затем формируются ЦК графита ($C_{\text{ЦК}}$):

$$C_{\text{СН}} + C_{\text{a3}} = C_{\text{ЦК}}. \quad (10)$$

Заканчивается процесс кристаллизации $C_{\text{МК}}$ реакцией:

$$C_{\text{ЦК}} + C_{\text{СН}} + C_{\text{a3}} = C_{\text{МК}}. \quad (11)$$

Из реакций (2)–(4) и (6)–(11) следует, что структура СЧ будет определяться концентрациями $A_{\text{ЦКП}}$, $A_{\text{ЦКЭ}}$, $C_{\text{ЦК}}$. Чем они выше, тем более дисперсной становится структура СЧ. Из реакций (2)–(4) и (6)–(8) следует, что микрокристаллы аустенита СЧ не могут быть твердыми растворами атомов углерода и кремния в кристаллической решетке γ -Fe.

На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние будут оказывать атомы водорода. Они образуются при взаимодействии молекул воды атмосферного воздуха с нанокристаллами и атомами железа расплавов СЧ [11]. В этих расплавах атомы водорода находятся как в растворенном, так и

в адсорбированном состоянии. Стандартная теплота адсорбции атомарного водорода на железе равна 143 кДж/моль [12]. При этом они не образуют твердый раствор внедрения [11]. Между адсорбированным водородом $\{H\}$ и растворенным водородом устанавливается равновесие по закону Генри [13]:

$$\{H\} = k_1 [H], \quad (12)$$

где k_1 – константа Генри.

На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние будут оказывать атомы кислорода. Они образуются при диссоциации молекул кислорода атмосферного воздуха на нанокристаллах железа расплавов СЧ [11]. В этих расплавах атомарный кислород находится как в растворенном, так и в адсорбированном состоянии. Стандартная теплота адсорбции атомов кислорода на железе составляет 570 кДж/моль [12]. Атомарный кислород, адсорбируясь на нанокристаллах железа в расплавах СЧ, не будет вступать в реакцию с этими нанокристаллами, поскольку стандартная теплота адсорбции атомов кислорода на железе больше стандартной теплоты образования FeO (265 кДж/моль) [14]. При этом атомарный кислород не образует с нанокристаллами железа твердый раствор внедрения [11]. Между адсорбированным кислородом $\{O\}$ и растворенным кислородом устанавливается равновесие по закону Генри [13]:

$$\{O\} = k_2 [O], \quad (13)$$

где k_2 – константа Генри.

В СЧ содержится достаточное количество атомов кремния, которые служат хорошими раскислителями и снижают в расплавах СЧ концентрацию растворенного кислорода. В таком случае, согласно уравнению (13), будет уменьшаться и концентрация адсорбированного кислорода. Это снижает поверхностную активность атомов кислорода на нанокристаллах железа, что делает ее сравнимой с аналогичной поверхностной активностью атомов водорода в расплавах СЧ.

Атомы водорода и кислорода, адсорбируясь на нанокристаллах железа, препятствуют объединению нанокристаллов в ЦК аустенита, что приводит к уменьшению их концентраций и укрупнению микрокристаллов аустенита. Адсорбированные атомы кислорода и водорода оказывают демодифицирующее влияние на структуру аустенита при кристаллизации СЧ. Согласно уравнениям (12)–(13), для измельчения микрокристаллов аустенита СЧ необходимо снизить в расплавах концентрации растворенных атомов водорода и кислорода.

На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние будет оказывать молекулярный водород. Выделяясь на ветвях дендритных микрокристаллов аустенита, молекулярный водород препятствует разветвлению дендритов, что приводит к формированию крупных дендритных ветвей и большой неоднородности структуры отливок.

Модификаторы СЧ, содержащие такие химически активные элементы, как Al, Ca, Mg, Ba, Ce, уменьшают концентрации растворенных в расплавах атомов водорода и кислорода. При обработке жидких СЧ модификаторами дегазация расплавов от водорода происходит в основном за счет эффективной адсорбции атомарного водорода соединениями модифицирующих элементов (неметаллических включений), которые являются активными раскислителями и гидридообразователями [15]. Причем эти неметаллические включения (НМВ) не могут быть ЦК микрокристаллов аустенита, поскольку их кристаллические решетки не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского [16].

На кристаллизацию графита СЧ большое влияние будут оказывать растворенные в расплавах атомы водорода, кислорода и серы. Стандартная теплота адсорбции атомарного кислорода на графите равна 335 кДж/моль [17]. Атомы кислорода, адсорбируясь на нанокристаллах графита в расплавах СЧ, не будут вступать в реакцию с этими нанокристаллами, поскольку стандартная теплота адсорбции атомарного кислорода на графите больше стандартной теплоты образования оксида углерода (111 кДж/моль) [14].

В расплавах СЧ сильным поверхностно-активным элементом для нанокристаллов графита служит атомарный водород. Известно, что при затвердевании СЧ водород дает сильный отбеливающий эффект, блокируя зарождение графита [18]. Высокая поверхностная активность атомарных водорода и кислорода на нанокристаллах графита в расплавах СЧ объясняется тем, что водород и кислород могут образовывать с углеродом прочные химические соединения. Такое соединение с водородом образует и сера. Поэтому ее атомы, растворенные в расплавах СЧ, обладают высокой поверхностной активностью на нанокристаллах графита.

В расплавах СЧ индукционной плавки содержится 0,03–0,05 % растворенных атомов серы и 0,003–0,005 % растворенных атомов кислорода [19]. Поэтому сера в расплавах СЧ будет активно

адсорбироваться на нанокристаллах графита. Между адсорбированной серой $\{S\}$ и растворенной серой в расплавах СЧ устанавливается равновесие по закону Генри [13]:

$$\{S\} = k_3 [S], \quad (14)$$

где k_3 – константа Генри.

Атомы водорода, кислорода, серы, адсорбируясь на нанокристаллах графита, препятствуют объединению нанокристаллов в ЦК микрокристаллов графита. Это приводит к уменьшению концентрации этих центров и укрупнению микрокристаллов графита. Повышение концентраций атомов водорода, кислорода, серы сверх критических способствует образованию аустенитно-цементитной эвтектики при кристаллизации СЧ.

Адсорбированные атомы водорода, кислорода, серы оказывают демодифицирующее влияние на структуру графита АГЭ СЧ. Согласно уравнениям (12)–(14), для измельчения микрокристаллов графита СЧ необходимо снизить в расплавах концентрации растворенных атомов водорода, кислорода и серы.

Модификаторы СЧ снижают концентрации растворенных в расплавах атомов демодифицирующих элементов, увеличивая концентрации ЦК микрокристаллов графита. При этом НМВ не могут быть ЦК микрокристаллов графита, поскольку их кристаллические решетки не соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского [16].

Механизм действия модификаторов СЧ заключается в повышении интенсивности объединения нанокристаллов в ЦК микрокристаллов аустенита и графита при затвердевании отливок. Основным недостатком модификаторов СЧ является существование критических концентраций модифицирующих элементов в расплавах, при превышении которых снижаются концентрации ЦК аустенита и графита, что способствует демодифицирующему эффекту и отбелу. Поэтому концентрации модифицирующих элементов в расплавах СЧ должны быть оптимальными. Снижение концентраций растворенных в расплавах атомов водорода, кислорода, серы и поддержание их значений на оптимальном уровне – эффективный способ модифицирования структуры отливок СЧ.

Магний при модифицировании СЧ находится в расплавах в газообразном (атомарном) состоянии, поэтому является наиболее сильным раскислителем и десульфуратором СЧ. Пузырьки магния также хорошо дегазируют расплавы СЧ от водорода.

При обработке расплава ЧПГ эвтектического состава лигатурой Ni–Mg получали отливки ЧШГ, которые содержали $4 \cdot 10^{-3}\%$ серы и $7 \cdot 10^{-4}\%$ кислорода [20]. До этого в исходном чугуна находилось $2 \cdot 10^{-2}\%$ серы и $35 \cdot 10^{-4}\%$ кислорода. Модифицирование чугуна лигатурой Ni–Mg уменьшило в нем концентрации серы и кислорода в 5 раз. Но если модифицированный расплав находился на воздухе определенное время, то в нем концентрация кислорода повышалась до $18 \cdot 10^{-4}\%$, что приводило к получению ЧПГ [20]. Поэтому форма графита в СЧ зависит от концентраций в расплавах серы и кислорода, адсорбированных на нанокристаллах графита, что подтверждается тем, что межфазное поверхностное натяжение на границе расплав – графит для ЧПГ существенно ниже, чем у ЧШГ [20, 21].

При кристаллизации СЧ графит формируется в виде дендритных микрокристаллов с разными разветвленностями в виде лепестков [8, 22]. Наиболее разветвленными являются дендриты графита ЧШГ. Каждый такой микрокристалл имеет вид дендрита, состоящего из одинаковых радиально разветвленных ветвей, выросших из одного центра, сформированного из нанокристаллов графита [8].

Модификаторы СЧ, уменьшая в расплавах концентрации атомарных кислорода и серы, способствуют при кристаллизации АГЭ формированию более разветвленных дендритных микрокристаллов графита. Магний, как самый эффективный модифицирующий элемент СЧ, приводит к образованию наиболее разветвленных сферических дендритных микрокристаллов графита.

При кристаллизации СЧ молекулярный водород в основном выделяется на дендритных микрокристаллах аустенита, поэтому непосредственно не может влиять на разветвление дендритных микрокристаллов графита.

В СЧ водород оказывает двоякое действие на кристаллизацию графита. При повышении содержания водорода в расплавах с 30 до 60 см³/100 г дисперсность дендритных микрокристаллов графита уменьшается, а их разветвленность увеличивается вплоть до образования дендритов графита шаровидной формы [18]. Это происходит благодаря действиям атомарного и молекулярного водорода. Последний в основном выделяется на дендритных микрокристаллах аустенита, снижая степень их разветвленности. Атомарный водород уменьшает дисперсность микрокристаллов АГЭ. При кристаллизации СЧ повышенное содержание водорода в расплавах приводит к образованию крупных, малоразветвленных, микропористых,

рыхлых дендритных микрокристаллов аустенита. Это способствует разветвлению крупных дендритных микрокристаллов графита, которым легче преодолеть сопротивление рыхлого аустенита. Мелкие дендритные микрокристаллы графита при кристаллизации СЧ могут разветвляться в менее рыхлых микрокристаллах аустенита.

Повышенная скорость затвердевания СЧ оказывает двоякое действие на кристаллизацию АГЭ. До определенных критических значений эта скорость уменьшает демодифицирующее влияние водорода, кислорода, серы, способствуя модифицированию АГЭ. При превышении критической скорости затвердевания СЧ в отливках формируется аустенитно-цементитная эвтектика.

Выводы

1. Кристаллизация СЧ – наноструктурный процесс, в котором нанокристаллы железа, кремния и графита, соединяясь атомами железа, кремния и углерода, образуют микрокристаллы аустенита, а нанокристаллы графита, соединяясь атомами углерода, образуют микрокристаллы графита. Причем микрокристаллы аустенита не являются твердыми растворами атомов кремния и углерода в кристаллической решетке γ -Fe.

2. На кристаллизацию аустенита СЧ большое влияние оказывают:

- атомы кислорода и водорода, которые являются демодифицирующими элементами, укрупняющими микрокристаллы аустенита;
- молекулярный водород, выделяющийся на ветвях дендритных микрокристаллов аустенита, он препятствует разветвлениям дендритов, приводя к демодифицированию структуры аустенита;
- атомы водорода, кислорода и серы, которые являются демодифицирующими элементами структуры графита.

3. Модификаторы СЧ снижают в расплавах концентрации демодифицирующих элементов, увеличивая интенсивность объединения нанокристаллов в ЦК микрокристаллов аустенита и графита. Но концентрации модифицирующих элементов в расплавах СЧ должны быть оптимальными.

4. Самым эффективным модифицирующим элементом СЧ служит магний. Он измельчает структуру СЧ и способствует формированию наиболее разветвленных, шаровидных дендритных микрокристаллов графита.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воздвиженский, В. М.** Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении / В. М. Воздвиженский, В. А. Грачев, В. В. Спасский. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
2. **Лахтин, Ю. М.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Металловедение / И. И. Новиков [и др.]. – Т. 1. – М.: Изд. дом МИСиС, 2009. – 496 с.
4. **Солнцев, Ю. П.** Материаловедение: учебник для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2017. – 784 с.
5. **Ойкс, Г. Н.** Производство стали (основы теории и технология) / Г. Н. Ойкс. – М.: Металлургия, 1974. – 440 с.
6. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справочник. М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
7. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
8. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
9. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная кристаллизация металлов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2021. – № 2. – С. 23–26.
10. Механизм сохранения структурной информации силуминов в системе «твердое – жидкое – твердое» / Е. И. Марукович [и др.] // Цветные металлы. – 2024. – № 11. – С. 32–34.
11. **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.
12. Константы взаимодействия металлов с газами: справочник / под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
13. **Жуховицкий, А. А.** Физическая химия / А. А. Жуховицкий, Л. А. Шварцман. – М.: Металлургия, 2001. – 688 с.
14. Физико-химические свойства окислов: справочник / под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
15. **Антонова, М. М.** Свойства гидридов металлов: справочник / М. М. Антонова. – Киев: Наукова думка, 1975. – 128 с.
16. **Стеценко, В. Ю.** Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой: дис. ... д-ра техн. наук / В. Ю. Стеценко. – Минск, БНТУ, 2021. – 60 с.
17. **Вейлас, С.** Химическая кинетика и расчеты промышленных реакторов / С. Вейлас. – М.: Химия, 1964. – 432 с.
18. **Шаповалов, В. И.** Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов / В. И. Шаповалов. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
19. **Шумихин, В. С.** Физико-химические процессы электроплавки чугуна / В. С. Шумихин, А. К. Билецкий. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168 с.

20. Межфазное натяжение и форма графита, кристаллизующегося в жидком чугуна / Б.С. Мильман [и др.] // Литейное производство. – 1976. – № 5. – С. 3–6.
21. Кульбовский, И.К. Факторы, влияющие на структуру графита в отливках из чугуна / И.К. Кульбовский, Р.А. Богданов // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 19–21.
22. Михайлов, А.М. О механизме и движущих силах сфероидизации графита / А.М. Михайлов, А.П. Воробьев // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. – 1988. – № 11. – С. 104–111.

REFERENCES

1. Vozdvizhenskiy V.M., Grachev V.A., Spasskiy V.V. *Litejnye splavy i tekhnologiya ih plavki v mashinostroenii* [Foundry alloys and their melting technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 432 p.
2. Lahtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
3. Novikov I.I., Zolotarevskiy V.S., Portnoj V.K. [et al.]. *Metallovedenie* [Metallurgical science]. Moscow, Izdatel'skiy Dom MISiS Publ., 2009, vol. 1, 496 p.
4. Solncev Yu. P., Pryahin E.I. *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science: textbook for universities]. Saint-Petersburg, Himizdat Publ., 2017, 784 p.
5. Ojks G.N. *Proizvodstvo stali (osnovy teorii i tekhnologiya)* [Steel production (fundamentals of theory and technology)]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974, 440 p.
6. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva. Spravochnik* [Properties of elements. Part 1. Physical properties. Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 600 p.
7. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. Nanostrukturnaya teoriya metallicheskih rasplavov [Nanostructural theory of metal melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
8. 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.
9. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V. Nanostrukturnaya kristallizatsiya metallov [Nanostructural crystallization of metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
10. Marukovich E.I., Nikitin K.V., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V. Mekhanizm sohraneniya strukturnoj informatsii siluminov v sisteme «tverdoe – zhidkoe – tverdoe» [Mechanism to preserve silumins structural information in the “solid – liquid – solid” system]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2024, no. 11, pp. 76–81.
11. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu., Stetsenko A.V. O rastvorimosti gazov v zhidkih litejnykh splavakh [On the solubility of gases in liquid casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 1, pp. 32–34.
12. Kolachev B.A., Levinsky Yu. V. (ed.) *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami* [Constants of interaction of metals with gases: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
13. Zhuhovickiy A.A., Shvarcman L.A. *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
14. Samsonov G.V. (ed.) *Fiziko-himicheskie svoystva oksidov: spravochnik* [Physico-chemical properties of oxides: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
15. Antonova M.M. *Svoystva gidridov metallov: spravochnik* [Properties of metal hydrides: reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975, 128 p.
16. Stetsenko V.Yu. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya zagotovok povyshennoj iznosostojkosti iz siluminov s vysokodispersnoy invertirovannoy 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: auto ref. dis... Dr. Tech. sciences]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 60 p.
17. Vejlas S. *Himicheskaya kinetika i raschety promyshchlennykh reaktorov* [Chemical kinetics and calculations of industrial reactors]. Moscow, Himiya Publ., 1964, 432 p.
18. Shapovalov V.I. *Vliyanie vodoroda na strukturu i svoystva zhelezouglerodistykh splavov* [Influence of hydrogen on structure and properties of iron-carbon alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 232 p.
19. Shumihin V.S., Bileckiy A.K. *Fiziko-himicheskie processy elektropлавки chuguna* [Physical and chemical processes of cast iron electric melting]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989, 168 p.
20. Mil'man B. S., Aleksandrov N.N., Solenkov V.G. [et al.]. *Mezhfaznoe natyazhenie i forma grafit, kristallizuyushchegosya v zhidkom chugune* [Interfacial tension and shape of graphite crystallizing in liquid cast iron]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 1976, no. 5, pp. 3–6.
21. Kul'bovskiy I. K., Bogdanov R.A. Faktory, vliyayushchie na strukturu grafit v otlivkakh iz chuguna [Factors affecting graphite structure in cast iron castings]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of machinery building*, 2006, no. 5, pp. 19–21.
22. Mihajlov A.M., Vorob'ev A. P. O mekhanizme i dvizhushchih silah sferoidizatsii grafit [About the mechanism and driving forces of graphite spheroidization]. *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Chernaya metallurgiya = Proceedings of the Higher Educational Institution. Ferrous Metallurgy*, 1988, no. 11, pp. 104–111.