



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-13-19>
УДК 621.745.35

Поступила 08.06.2022
Received 08.06.2022

НАНОСТРУКТУРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

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

Показано, что кристаллизация литейных сплавов является наноструктурным процессом. Микрокристаллы фаз в интервале температур ликвидуса и солидуса при эвтектической и перитектической реакциях формируются из нанокристаллов компонентов A и B сплавов, их свободных атомов и атомных комплексов. Микрокристаллы первичного аустенита и аустенитно-графитной эвтектики при кристаллизации чугунов, микрокристаллы аустенита и δ -феррита при кристаллизации стали формируются в результате наноструктурных реакций из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа и графита, железоуглеродных комплексов. Первичные и эвтектические микрокристаллы силумина формируются из элементарных нанокристаллов алюминия и кремния, свободных атомов алюминия и кремния, алюминиево-кремниевых комплексов.

Ключевые слова. *Наноструктурная кристаллизация, нанокристаллы, свободные атомы, атомные комплексы, сталь, чугуны, силумины.*

Для цитирования. *Марукович, Е. И. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 13–19. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-13-19>.*

NANOSTRUCTURED CRYSTALLIZATION OF CASTING ALLOYS

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

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

Crystallization of casting alloys has been shown to be a nanostructured process. Microcrystals of phases in the temperature range of liquidus and solidus, during eutectic and peritectic reactions, are formed from nanocrystals of components A and B of alloys, their free atoms and atomic complexes. Microcrystals of primary austenite and austenite-graphite eutectics during crystallization of cast iron, microcrystals of austenite and δ -ferrite during crystallization of steel are formed as a result of nanostructural reactions from elementary nanocrystals of iron and graphite, free atoms of iron and graphite, iron-carbon complexes. Primary and eutectic microcrystals of silumin are formed from elementary nanocrystals of aluminum and silicon, free atoms of aluminum and silicon, aluminum-silicon complexes.

Keywords. *Nanostructured crystallization, nanocrystals, free atoms, atomic complexes, steel, iron, silumins.*

For citation. *Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructured crystallization of casting alloys. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 13–19. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-13-19>.*

Литейные сплавы в основном состоят из двух компонентов A и B . Кристаллизация металлов является наноструктурным процессом [1]. Жидкие металлы в основном состоят из элементарных нанокристаллов и свободных атомов [2, 3]. При кристаллизации расплава они связываются, образуя микрокристаллы. Поэтому компоненты A и B литейных сплавов можно представить в виде элементарных нанокристаллов, связанных между собой соединительными атомами.

Литейный сплав можно получить растворением твердого компонента B в жидком компоненте A . При этом свободные атомы расплава взаимодействуют с соединительными атомами твердого вещества, образуя атомные комплексы. В результате компонент B распадается на элементарные нанокристаллы или на них и свободные атомы. При кристаллизации жидкого бинарного сплава происходят реакции между нанокристаллами, между ними и свободными атомами, между нанокристаллами и атомными комплексами.

Рассмотрим наноструктурные процессы, происходящие при кристаллизации литейных сплавов в интервале температур ликвидуса и солидуса. Формирование микрокристаллов компонента B ($B_{\text{МК}}$) про-

исходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы компонента B (B_{CH}) из элементарных нанокристаллов $B_{\text{ЭН}}$ и свободных атомов B_a по следующей реакции:



Затем формируются центры кристаллизации компонента B ($B_{\text{ЦК}}$):



Заканчивается процесс кристаллизации образованием $B_{\text{МК}}$ по реакции:



Формирование микрокристаллов $\alpha_{\text{МК}}$ на основе компонента A происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы α_{CH} из элементарных нанокристаллов компонента A ($A_{\text{ЭН}}$), свободных атомов компонента A (A_a) и атомных комплексов $(B_n A_m)_\text{К}$ по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации $\alpha_{\text{ЦК}}$:



Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ по реакции:



Формирование микрокристаллов $\beta_{\text{МК}}$ на основе компонента B происходит аналогично $\alpha_{\text{МК}}$. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы β_{CH} из элементарных нанокристаллов компонента B ($B_{\text{ЭН}}$), свободных атомов компонента B (B_a) и атомных комплексов $(B_n A_m)_\text{К}$ по реакции:



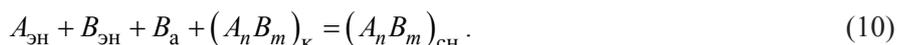
Затем формируются центры кристаллизации $\beta_{\text{ЦК}}$:



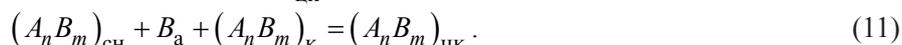
Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\beta_{\text{МК}}$ по реакции:



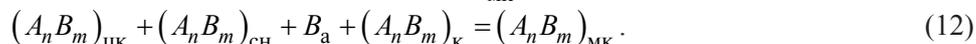
Формирование микрокристаллов интерметаллида $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы $(A_n B_m)_{\text{CH}}$ из $A_{\text{ЭН}}$, $B_{\text{ЭН}}$, B_a и атомных комплексов $(A_n B_m)_\text{К}$ по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации $(A_n B_m)_{\text{ЦК}}$:



Заканчивается процесс кристаллизации образованием $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ по реакции:



Рассмотрим наноструктурные процессы, происходящие при эвтектической кристаллизации жидких литейных сплавов. В этом случае формируются сразу два вида микрокристаллов. Если образуются $\alpha_{\text{МК}}$ и $B_{\text{МК}}$, то процесс кристаллизации происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы по реакциям (1) и (4). Затем образуются центры кристаллизации согласно (2) и (5). Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ и $B_{\text{МК}}$ по реакциям (3) и (6).

Эвтектическая кристаллизация с формированием $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы по реакциям (4) и (7). Затем формируются центры кристаллизации согласно (2) и (8). Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ и $\beta_{\text{МК}}$ по реакциям (3) и (9).

Эвтектическая кристаллизация с формированием $\alpha_{\text{МК}}$ и $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы по реакциям (4) и (10). Затем формируются центры кристаллизации согласно (5) и (11). Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\alpha_{\text{МК}}$ и $(A_n B_m)_{\text{МК}}$ по реакциям (6) и (12).

Рассмотрим наноструктурные процессы, происходящие при перитектической кристаллизации литейных сплавов. Пусть $\alpha_{\text{МК}}$ взаимодействует с жидким сплавом с образованием $\beta_{\text{МК}}$. При температуре

перитектической реакции $\alpha_{\text{МК}}$ распадается на $A_{\text{ЭН}}$, A_a и $(B_n A_m)_\text{К}$. Эти компоненты взаимодействуют с аналогичными составляющими расплава. При этом сначала образуются структурообразующие нанокристаллы $\beta_{\text{СН}}$ по реакции:



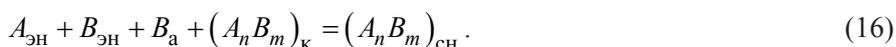
Затем формируются центры кристаллизации $\beta_{\text{ЦК}}$:



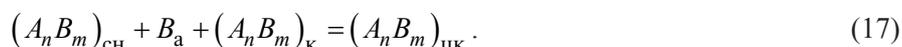
Заканчивается процесс кристаллизации образованием $\beta_{\text{МК}}$ по реакции:



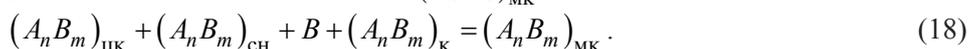
Если концентрация компонента B в сплаве относительно велика, то вместо $\beta_{\text{МК}}$ образуются $(A_n B_m)_\text{МК}$. Тогда перитектическая кристаллизация происходит следующим образом. Сначала формируются $(A_n B_m)_\text{СН}$ по реакции:



Затем образуются $(A_n B_m)_\text{ЦК}$ по реакции:



Заканчивается процесс кристаллизации формированием $(A_n B_m)_\text{МК}$ по реакции:



Рассмотрим, как пример, наноструктурную кристаллизацию литейных железоуглеродистых сплавов, до 9 ат. % углерода называются сталью, а свыше этой концентрации – чугунами [4, 5]. Их можно получать растворением графита в жидком железе.

При плавлении железа происходит реакция [2]:



где $\text{Fe}_{\text{МК}}$, $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$, Fe_a – соответственно микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы железа; e_1 , u_1 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов железа; $\Delta H_{\text{ПЖ}}$ – молярная энтальпия плавления железа.

$\Delta H_{\text{ПЖ}} = 13,8$ кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) железа ($\Delta H_{\text{СЖ}}$) составляет 417,6 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов железа при плавлении определяется по уравнению [2]:

$$u_1 = \frac{\Delta H_{\text{ПЖ}}}{\Delta H_{\text{СЖ}}}. \quad (20)$$

Подставляя исходные данные в (20), получаем $u_1 = 3$ ат. %. Соответственно $e_1 = 97$ ат. %.

При растворении графита происходит реакция, аналогичная (19):



где $C_{\text{МК}}$, $C_{\text{ЭН}}$, C_a – соответственно микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы графита; e_2 , u_2 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов графита; $\Delta H_{\text{РГ}}$ – молярная энтальпия растворения графита.

$\Delta H_{\text{РГ}}$ равна молярной теплоте кристаллизации графита и составляет 71,34 кДж/моль [7]. Молярная энтальпия сублимации (атомизации) графита ($\Delta H_{\text{СГ}}$) равна 717,8 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов графита при растворении графита определяется по уравнению [2]:

$$u_2 = \frac{\Delta H_{\text{РГ}}}{\Delta H_{\text{СГ}}}. \quad (22)$$

Подставляя исходные данные в (22), получаем $u_2 = 10$ ат. %. Соответственно $e_2 = 90$ ат. %.

При растворении графита в жидком железе происходит взаимодействие Fe_a с C_a с образованием железоуглеродных комплексов (ЖУК). В результате микрокристаллы графита распадаются на элементарные нанокристаллы по реакции:



Элементарными ЖУК являются соединения Fe_3C .

В промышленности в основном применяются доэвтектические и эвтектические чугуны, содержащие аустенитно-графитную эвтектику (АГЭ). Она образуется при кристаллизации расплава, содержащего 17 ат. % углерода [4]. Тогда в жидком эвтектическом чугуне содержатся: $Fe_{ЭН} - 80,5$ ат.%; $C_{ЭН} - 15,3$; $C_a - 0,9$; ЖУК – 3,3 ат. % .

АГЭ формируется при более медленной эвтектической реакции. Образование $C_{МК}$ в АГЭ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы графита ($C_{СН}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации графита ($C_{ЦК}$):



Заканчивается процесс формированием $C_{МК}$ по реакции:



Образование микрокристаллов аустенита АГЭ ($A_{МКГ}$) происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита АГЭ ($A_{СНГ}$) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации аустенита АГЭ ($A_{ЦКГ}$):



Заканчивается процесс формированием $A_{МКГ}$ по реакции:



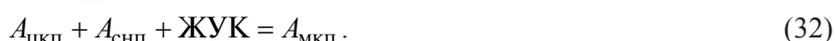
При кристаллизации доэвтектического чугуна сначала образуются первичные микрокристаллы аустенита ($A_{МКП}$), а затем – АГЭ. Формирование $A_{МКП}$ происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы первичного аустенита ($A_{СНП}$) по реакции:



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



Заканчивается процесс образованием $A_{МКП}$ по реакции:



При содержании в стали от 2,5 до 9,0 ат. % углерода расплав кристаллизуется с образованием аустенита. До концентрации 2,5 ат. % углерода жидкая сталь кристаллизуется с формированием δ -феррита, а при 1496 °С происходит перитектическая реакция с образованием аустенита [4, 5].

В расплаве с концентрацией углерода 9 ат. % содержатся: $Fe_{ЭН} - 88,3$ ат.%; $C_{ЭН} - 8,1$; ЖУК – 3,6 ат. %. В жидкой стали с концентрацией углерода 2,5 ат. % содержатся: $Fe_{ЭН} - 94,5$ ат.%; $Fe_a - 2,0$; $C_{ЭН} - 2,25$; ЖУК – 1,0 ат. %. Поэтому в расплаве стали с концентрацией углерода от 2,5 до 9,0 ат. % содержатся $Fe_{ЭН}$, $C_{ЭН}$, Fe_a и ЖУК. Тогда образование микрокристаллов аустенита стали ($A_{МКС}$) при кристаллизации такого расплава происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита стали ($A_{СНС}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации аустенита стали ($A_{ЦКС}$):



Заканчивается процесс формированием $A_{МКС}$ по реакции:



В жидкой стали с концентрацией углерода 0,8 ат. % содержатся: $Fe_{ЭН} - 96,20$ ат.%; $C_{ЭН} - 0,72$; $Fe_a - 2,76$; ЖУК – 0,32 ат. %. Поэтому в расплаве с концентрацией углерода до 2,5 ат. % находятся $Fe_{ЭН}$, $C_{ЭН}$, Fe_a и ЖУК. Тогда образование микрокристаллов δ -феррита ($\Phi_{МК}$) при кристаллизации такой жидкой стали происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы δ -феррита ($\Phi_{СН}$) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации δ -феррита ($\Phi_{\text{цк}}$):



Заканчивается процесс формированием $\Phi_{\text{мк}}$ по реакции:



В стали с концентрацией углерода от 0,5 до 2,5 ат. % после окончания кристаллизации феррита происходит перитектическая реакция. Она заключается в том, что 85% $\Phi_{\text{мк}}$ с концентрацией углерода 0,5 ат. % реагирует с 15% расплава с концентрацией углерода 2,5 ат. % с образованием микрокристаллов аустенита перитектической реакции ($A_{\text{мкр}}$) с концентрацией углерода 0,8 ат. % [4]. При температуре 1496 °С $\Phi_{\text{мк}}$ распадается на $\text{Fe}_{\text{эн}}$, $C_{\text{сн}}$, Fe_a и ЖУК. Эти компоненты $\Phi_{\text{мк}}$ взаимодействуют с аналогичными составляющими расплава. При этом сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита перитектической реакции ($A_{\text{снр}}$):



Затем образуются центры кристаллизации аустенита перитектической реакции ($A_{\text{цкр}}$):



Заканчивается процесс формированием $A_{\text{мкр}}$ по реакции:



Рассмотрим, как пример, наноструктурную кристаллизацию силуминов. Это алюминиево-кремниевые сплавы, содержащие эвтектику. Относительно нее различают доэвтектические, эвтектические и заэвтектические силумины. Алюминиево-кремниевая эвтектика формируется при кристаллизации расплава, содержащего 12 ат. % кремния [8].

Силумины можно получать растворением кремния в жидком алюминии. При плавлении алюминия происходит следующая реакция [2]:



где $\text{Al}_{\text{мк}}$ – микрокристаллы алюминия; Al_a – свободные атомы алюминия; m_1 и n_1 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов алюминия; $\Delta H_{\text{па}}$ – молярная энтальпия плавления алюминия.

$\Delta H_{\text{па}} = 10,8$ кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) алюминия ($\Delta H_{\text{са}}$) составляет 329,8 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов алюминия при плавлении определяется уравнением [2]:

$$n_1 = \frac{\Delta H_{\text{па}}}{\Delta H_{\text{са}}}. \quad (43)$$

Подставляя исходные данные в (43), получаем $n_1 = 3$ ат. %. Соответственно $m_1 = 97$ ат. %.

При плавлении кремния происходит реакция, аналогичная (42):



где $\text{Si}_{\text{мк}}$ – микрокристаллы кремния; $\text{Si}_{\text{эн}}$ – элементарные нанокристаллы кремния; Si_a – свободные атомы кремния; m_2 и n_2 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов кремния; $\Delta H_{\text{пк}}$ – молярная энтальпия плавления кремния.

$\Delta H_{\text{пк}} = 50$ кДж/моль, а молярная энтальпия сублимации (атомизации) кремния ($\Delta H_{\text{ск}}$) составляет 452,5 кДж/моль [6]. Атомная концентрация свободных атомов кремния при плавлении определяется уравнением [2]:

$$n_2 = \frac{\Delta H_{\text{пк}}}{\Delta H_{\text{ск}}}. \quad (45)$$

Подставляя исходные данные в (45), получаем $n_2 = 11$ ат. %. Соответственно $m_2 = 89$ ат. %. Атомы кремния являются связующими нанокристаллов кремния.

При растворении кремния в жидком алюминии происходит взаимодействие Al_a с Si_a с образованием алюминиево-кремниевых комплексов (АКК). В результате микрокристаллы кремния распадаются на элементарные нанокристаллы по реакции:



После растворения кремния в жидком эвтектическом силумине содержатся: $Al_{ЭН} - 86,4$ ат.%; $Si_{ЭН} - 10,7$; АКК – 2,9 ат.%. Элементарными АКК являются соединения Al_2Si .

В результате эвтектической реакции расплав распадается на 11% β_{Si} -фазы с концентрацией алюминия 0,5 ат.% и 89% α -фазы с концентрацией кремния 1,6 ат.% [8–10]. Тогда образование микрокристаллов α -фазы ($\alpha_{МК}$) при эвтектической реакции происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы α -фазы ($\alpha_{СН}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации α -фазы ($\alpha_{ЦК}$):



Заканчивается процесс формированием $\alpha_{МК}$ по реакции:



Образование микрокристаллов β_{Si} -фазы ($\beta_{МК}$) при эвтектической реакции происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы β_{Si} -фазы ($\beta_{СН}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации β_{Si} -фазы ($\beta_{ЦК}$):



Заканчивается процесс образованием $\beta_{МК}$ по реакции:



Можно считать, что кристаллизация эвтектического силумина происходит по реакциям (47) – (52).

При кристаллизации доэвтектического силумина в первую очередь образуются микрокристаллы первичной α -фазы ($\alpha_{МКП}$), а затем – алюминиево-кремниевая эвтектика. $\alpha_{МКП}$ формируются следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы первичной α -фазы ($\alpha_{СНП}$) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации первичной α -фазы ($\alpha_{ЦКП}$):



Заканчивается процесс образованием $\alpha_{МКП}$ по реакции:



Алюминиево-кремниевая эвтектика формируется по реакциям (47) – (52).

При кристаллизации заэвтектического силумина в первую очередь формируются микрокристаллы первичной β_{Si} -фазы ($\beta_{МКП}$), а затем – алюминиево-кремниевая эвтектика. $\beta_{МКП}$ образуются следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы первичной β_{Si} -фазы ($\beta_{СНП}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации первичной β_{Si} -фазы ($\beta_{ЦКП}$):



Заканчивается процесс формированием $\beta_{МКП}$ по реакции:



Алюминиево-кремниевая эвтектика образуется по реакциям (47) – (52).

Рассмотрим процесс образования интерметаллида $FeAl_3$ в расплаве алюминия [4]. Последний состоит из элементарных нанокристаллов алюминия ($Al_{ЭН}$) и свободных атомов алюминия (Al_a), а твердое железо – из элементарных нанокристаллов железа ($Fe_{ЭН}$) и связующих атомов железа (Fe_a). С последними в процессе растворения железа взаимодействуют свободные атомы алюминия с образованием железо-алюминиевых комплексов (ЖАК). В результате микрокристаллы железа ($Fe_{МК}$) распадаются на элементарные нанокристаллы по реакции:

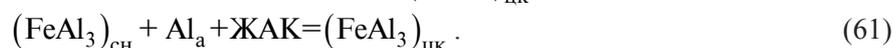


Элементарными ЖАК являются FeAl_3 .

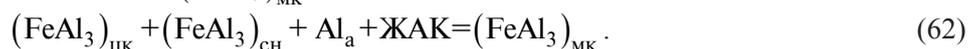
Поскольку после образования ЖАК в расплаве остаются свободные атомы алюминия, то процесс кристаллизации микрокристаллов интерметаллида $(\text{FeAl}_3)_{\text{МК}}$ происходит следующим образом. Сначала в расплаве формируются структурообразующие нанокристаллы интерметаллида $(\text{FeAl}_3)_{\text{СН}}$ по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации интерметаллида $(\text{FeAl}_3)_{\text{ЦК}}$:



Заканчивается процесс образованием $(\text{FeAl}_3)_{\text{МК}}$ по реакции:



ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В.** Наноструктурная кристаллизация металлов // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 23–26.
2. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Наноструктурная теория металлических расплавов // *Литье и металлургия*. 2020. № 3. С. 7–9.
3. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В.** Расчет параметров элементарных нанокристаллов жидких металлов при температуре плавления // *Литье и металлургия*. 2021. № 4. С. 16–18.
4. *Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ.* / Под ред. О.А. Банных и М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
5. **Лившиц Б. Г.** *Металлография: учеб. для вузов*. М.: Металлургия, 1990. 236 с.
6. *Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ.* / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
7. **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.
8. **Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б.** *Сплавы алюминия с кремнием*. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
9. **Эллиот Р. П.** *Структура двойных сплавов: справ.* М.: Металлургия, 1970. 456 с.
10. **Немененок Б. М.** *Теория и практика комплексного модифицирования силуминов*. Минск: Технопринт, 1999. 272 с.

REFERENCES

1. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnaya kristallizatsiya metallov [Nanostructured crystallization of metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
2. **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.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Raschet parametrov elementarnyh nanokristallov zhidkih metallov pri temperature plavlenniya [Calculation of parameters of elementary nanocrystals of liquid metals at melting temperature]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 16–18.
4. *Diagrammy sostoyaniya dvoynyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza: Spravochnik* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
5. **Livshic B. G.** *Metallografiya. Uchebnik dlya vuzov* [Metallography. Textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 236 p.
6. *Svoystva elementov. CH. 1. Fizicheskie svoystva: Spravochnik* [Item Properties. Part 1. Physical Properties: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
7. **Zaharchenko E. V., Levchenko Yu. N., Gorenko V. G. i dr.** *Otlivki iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom* [Cast iron castings with spherical and vermicular graphite]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986, 248 p.
8. **Stroganov G. B., Rotenberg V. A., Gershman G. B.** *Splavy alyuminiya s kremniem* [Aluminium-silicon alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, 272 p.
9. **Elliot R. P.** *Struktura dvoynyh splavov: Spravochnik* [Double Alloy Structure: Reference Book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 456 p.
10. **Nemenenok B. M.** *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov: monografiya* [Theory and practice of complex modification of siluminis]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 1999, 272 p.