



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-37-39>
УДК 621.745.35

Поступила 20.12.2021
Received 20.12.2021

НАНОСТРУКТУРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЧУГУНОВ

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 чугунов является наноструктурным процессом. Аустенитно-графитная эвтектика формируется из нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа и графита. Аустенитно-цементитная эвтектика образуется из нанокристаллов железа и графита, свободных атомов графита и железо-углеродных комплексов. Первичные микрокристаллы аустенита формируются из нанокристаллов железа, графита и железо-углеродных комплексов.

Ключевые слова. Чугуны, кристаллизация, наноструктурный процесс, нанокристаллы, свободные атомы, микрокристаллы, железо-углеродные комплексы.

Для цитирования. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация чугунов // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 37–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-37-39>.

NANOSTRUCTURED CRYSTALLIZATION OF CAST IRON

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 cast iron has been shown to be a nanostructured process. Austenitic-graphite eutectic is formed from iron and graphite nanocrystals, free iron and graphite atoms. Austenitic-cementite eutectic is formed from iron and graphite nanocrystals, free graphite atoms and iron-carbon complexes. Primary austenite microcrystals are formed from iron nanocrystals, graphite and iron-carbon complexes.

Keywords. Iron, crystallization, nanostructured process, nanocrystals, free atoms, microcrystals, iron-carbon complexes.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructural crystallization of cast iron. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 1, pp. 37–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-37-39>.

Кристаллизация металлов является наноструктурным процессом [1]. Жидкие чугуны затвердевают с образованием эвтектики. Относительно нее различают доэвтектические, эвтектические и заэвтектические чугуны. Эвтектика формируется при кристаллизации железо-углеродного расплава, содержащего 17 ат. % углерода [2]. Чугуны можно получать растворением графита в жидком железе. При плавлении железа происходит реакция [3]:



где $\text{Fe}_{\text{мк}}$ – микрокристаллы железа; $\text{Fe}_{\text{а}}$ – свободные атомы железа; e_1 и 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 [4]. Атомная концентрация свободных атомов железа при плавлении определяется следующим уравнением [3]:

$$u_1 = \frac{\Delta H_{\text{пж}}}{\Delta H_{\text{сж}}}. \quad (2)$$

Подставляя исходные данные в (2), получаем $u_1 = 3$ ат. %. Соответственно $e_1 = 97$ ат. %.

При растворении графита происходит реакция, аналогичная (1):



где $C_{\text{мк}}$ – микрокристаллы графита; $C_{\text{эн}}$ – элементарные нанокристаллы графита; $C_{\text{а}}$ – свободные атомы графита; e_2 и u_2 – атомные концентрации элементарных нанокристаллов и свободных атомов графита; $\Delta H_{\text{рр}}$ – молярная энтальпия растворения графита.

$\Delta H_{\text{рр}}$ равна молярной теплоте кристаллизации графита в чугуна и составляет 71,34 кДж/моль [5]. Молярная энтальпия сублимации (атомизации) графита ($\Delta H_{\text{сг}}$) равна 717,8 кДж/моль [4].

Атомная концентрация свободных атомов графита при растворении графита определяется по уравнению [3]:

$$u_2 = \frac{\Delta H_{\text{рр}}}{\Delta H_{\text{сг}}} . \quad (4)$$

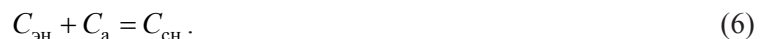
Подставляя исходные данные в (4), получаем $u_2 = 10$ ат. %. Соответственно $e_2 = 90$ ат. %. Атомы графита являются связующими нанокристаллов графита.

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



Элементарными ЖУК являются соединения Fe_3C . В жидком эвтектическом чугуна содержатся 80,5 ат. % $\text{Fe}_{\text{эн}}$; 15,3 ат. % $C_{\text{эн}}$; 0,9 ат. % C_a ; 3,3 ат. % ЖУК.

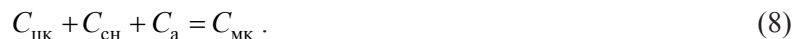
Аустенитно-графитная эвтектика (АГЭ) формируется при медленной эвтектической реакции. В этом случае основное количество ЖУК распадается на Fe_a и C_a . Тогда образование $C_{\text{мк}}$ в АГЭ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы графита ($C_{\text{сн}}$) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации графита ($C_{\text{цк}}$):



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



Образование микрокристаллов аустенита в АГЭ ($A_{\text{мкг}}$) происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита АГЭ ($A_{\text{снг}}$) по следующей реакции:



Затем формируются центры кристаллизации аустенита АГЭ ($A_{\text{цкг}}$):



Заканчивается процесс образованием $A_{\text{мкг}}$ по следующей реакции:



Аустенитно-цементитная эвтектика (АЦЭ) формируется при быстрой эвтектической реакции. В этом случае ЖУК не распадаются на Fe_a и C_a . Тогда образование микрокристаллов цементита ($\Pi_{\text{мк}}$) в АЦЭ происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы цементита ($\Pi_{\text{сн}}$) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации цементита ($\Pi_{\text{цк}}$):



Заканчивается процесс формированием ($\Pi_{\text{мк}}$) по реакции:



Образование микрокристаллов аустенита в АЦЭ ($A_{\text{мкц}}$) происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы аустенита АЦЭ ($A_{\text{снц}}$) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации аустенита АЦЭ ($A_{\text{цкц}}$):

$$A_{\text{снц}} + \text{ЖУК} = A_{\text{цкц}} \cdot \quad (16)$$

Заканчивается процесс образованием $A_{\text{мкц}}$ по реакции:

$$A_{\text{цкц}} + A_{\text{снц}} + \text{ЖУК} = A_{\text{мкц}} \cdot \quad (17)$$

Можно считать, что кристаллизация эвтектического чугуна происходит по реакциям (6) – (11) или (12) – (17). Если ЖУК при эвтектической реакции распадается на Fe_a и C_a только наполовину, то одновременно образуются АГЭ и АЦЭ. В этом случае получается половинчатый чугун.

При кристаллизации доэвтектического чугуна сначала формируются первичные микрокристаллы аустенита по реакциям, аналогичным (15) – (17), а затем – АГЭ или АЦЭ по реакциям (6) – (11) или (12) – (17). При кристаллизации заэвтектического чугуна сначала образуются первичные микрокристаллы графита или цементита по реакциям, аналогичным (6) – (8) или (12) – (14), а затем – АГЭ или АЦЭ по реакциям (6) – (11) или (12) – (17).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В.** Наноструктурная кристаллизация металлов // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 23–26.
2. *Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ.* / Под ред. О. А. Банньих и М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
3. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Наноструктурная теория металлических расплавов // *Литье и металлургия*. 2020. № 3. С. 7–9.
4. *Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ.* / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
5. **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.

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. *Diagrammy sostoyaniya dvojnyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza: Spravochnik* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems: Reference]. Pod red. O. A. Bannyih i M. E. Drica. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 440 p.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Nanostrukturnaya teoriya metallicheskikh rasplavov [Nanostructural theory of metal melts]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 7–9.
4. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva: Spravochnik* [Item Properties. Part 1. Physical Properties: Reference]. Pod red. G. V. Samsonova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
5. **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.