



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-31-33>  
УДК 621.745.35

Поступила 22.02.2022  
Received 22.02.2022

## НАНОСТРУКТУРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛИ

*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 стали является наноструктурным процессом. Микрокристаллы аустенита в жидкой стали с концентрацией углерода от 2,5 до 9,0 ат. %, микрокристаллы δ-феррита в расплаве с концентрацией углерода до 2,5 ат. %, микрокристаллы аустенита при перитектической реакции формируются из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа и железо-углеродных комплексов.*

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

**Для цитирования.** *Марукович, Е. И. Наноструктурная кристаллизация стали / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 31–33. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-31-33>.*

## NANOSTRUCTURED STEEL CRYSTALLIZATION

*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.*

*Steel crystallization has been shown to be a nanostructured process. Austenite microcrystals in liquid steel with a carbon concentration of 2.5 to 9 atomic percent, δ-ferrite microcrystals in melt with a carbon concentration of up to 2.5 atomic percent, austenite microcrystals in peritectic reaction are formed from elementary nanocrystals of iron and graphite, free iron atoms and iron-carbon complexes.*

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

**For citation.** *Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructured steel crystallization. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 2, pp. 31–33. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-31-33>.*

Кристаллизация металлов является наноструктурным процессом [1]. Сталь – это сплав железа с углеродом при его концентрации до 9 ат.% [2]. 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 [2, 3].

Сталь получается при растворении графита в жидком железе. При плавлении железа происходит реакция [4]:



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 энтальпия сублимации (атомизации) железа ( $\Delta H_{\text{СЖ}}$ ) составляет 417,6 кДж/моль [5]. Атомная концентрация свободных атомов железа при плавлении определяется по уравнению [4]:

$$u_1 = \frac{\Delta H_{\text{ПЖ}}}{\Delta H_{\text{СЖ}}}. \quad (2)$$

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;  $\Delta H_{\text{рг}}$  – молярная энтальпия растворения графита.

$\Delta H_{\text{рг}}$  равна молярной теплоте кристаллизации графита в чугуна и составляет 71,34 кДж/моль [6]. Молярная энтальпия сублимации (атомизации) графита ( $\Delta H_{\text{сг}}$ ) равна 717,8 кДж/моль [5]. Атомная концентрация свободных атомов графита при растворении графита определяется по уравнению [4]:

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

Подставляя исходные данные в (4), получаем  $u_2 = 10$  ат. %. Соответственно  $e_2 = 90$  ат. %.

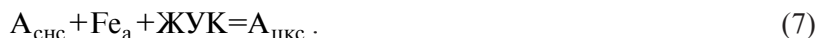
При растворении графита в жидком железе происходит взаимодействие  $\text{Fe}_a$  с  $C_a$  с образованием железо-углеродных комплексов (ЖУК). В результате микрокристаллы графита распадаются на элементарные нанокристаллы:



Элементарными ЖУК являются соединения  $\text{Fe}_3\text{C}$ . В расплаве с концентрацией углерода 9 ат. % содержатся 88,3 ат. %  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ ; 8,1 ат. %  $C_{\text{ЭН}}$ ; 3,6 ат. % ЖУК. В жидкой стали с концентрацией углерода 2,5 ат. % находятся 94,5 ат. %  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ ; 2,0 ат. %  $\text{Fe}_a$ ; 2,25 ат. %  $C_{\text{ЭН}}$ ; 1,0 ат. % ЖУК. Поэтому в расплаве стали с концентрацией углерода от 2,5 до 9 ат. % содержатся  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ ,  $C_{\text{ЭН}}$ ,  $\text{Fe}_a$  и ЖУК. Тогда формирование микрокристаллов аустенита стали ( $A_{\text{МКС}}$ ) при кристаллизации такого расплава происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы аустенита стали ( $A_{\text{СНС}}$ ) по следующей реакции:



Затем формируются центры кристаллизации аустенита стали ( $A_{\text{ЦКС}}$ ):



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



В жидкой стали с концентрацией углерода 0,8 ат. % содержатся 96,20 ат. %  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ ; 0,72 ат. %  $C_{\text{ЭН}}$ ; 2,76 ат. %  $\text{Fe}_a$ ; 0,32 ат. % ЖУК. Поэтому в расплаве стали с концентрацией углерода до 2,5 ат. % находятся  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ ,  $C_{\text{ЭН}}$ ,  $\text{Fe}_a$  и ЖУК. Тогда формирование микрокристаллов  $\delta$ -феррита ( $\Phi_{\text{МК}}$ ) при кристаллизации такой жидкой стали происходит следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы  $\delta$ -феррита ( $\Phi_{\text{СН}}$ ) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации  $\delta$ -феррита ( $\Phi_{\text{ЦК}}$ ):



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



В стали с концентрацией углерода от 0,5 до 2,5 ат. % после окончания кристаллизации  $\delta$ -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. % [2].

При температуре 1496 °С  $\Phi_{\text{МК}}$  распадается на  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ ,  $C_{\text{ЭН}}$ ,  $\text{Fe}_a$  и ЖУК. Эти компоненты  $\Phi_{\text{МК}}$  взаимодействуют с аналогичными составляющими расплава. При этом сначала образуются структурообразующие нанокристаллы аустенита перитектической реакции ( $A_{\text{СНП}}$ ):



Затем формируются центры кристаллизации аустенита перитектической реакции ( $A_{\text{ЦКР}}$ ):



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



Таким образом, кристаллизация стали является наноструктурным процессом, в котором большую роль играют нанокристаллы железа и графита, свободные атомы железа и железо-углеродные комплексы.

### 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. Банных и М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
3. **Лившиц Б. Г.** Металлография: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1990. 236 с.
4. **Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.** Наноструктурная теория металлических расплавов // *Литье и металлургия*. 2020. № 3. С. 7–9.
5. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 660 с.
6. **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 dvoynih i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza: Spravochnik* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
3. **Livshic B. G.** *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 236 p.
4. **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.
5. *Svoystva elementov. CH. 1. Fizicheskie svoystva: Spravochnik* [Item Properties. Part 1. Physical Properties: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
6. **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.