



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-57-60>  
УДК 621.745.35

Поступила 02.09.2024  
Received 02.09.2024

## ВТОРИЧНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТРУКТУРЕ 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*

*Предложен наноструктурный механизм вторичных превращений в структуре серых чугунов. Сначала из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа и углерода образуются структурообразующие нанокристаллы аустенита, феррита, цементита и графита. Из них формируются центры кристаллизации микрокристаллов фаз. Из этих центров, структурообразующих нанокристаллов фаз, свободных атомов железа и углерода образуются микрокристаллы аустенита, феррита, цементита и графита бинарных серых чугунов.*

**Ключевые слова.** Серые чугуны, вторичные превращения, наноструктурные процессы, центры кристаллизации, микрокристаллы, нанокристаллы.

**Для цитирования.** Марукович, Е.И. Вторичные превращения в структуре серых чугунов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. 2024. № 3. С 57–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-57-60>.

## SECONDARY TRANSFORMATIONS IN THE STRUCTURE OF GREY 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.*

*A nanostructural mechanism of secondary transformations in the structure of gray cast iron is proposed. First, structure-forming nanocrystals of austenite, ferrite, cementite and graphite are formed from elementary nanocrystals of iron and graphite, free atoms of iron and carbon. The crystallization centers of microcrystals of phases are formed from them. From these centers, structure-forming nanocrystals of phases, free iron and carbon atoms, microcrystals of austenite, ferrite, cementite and graphite of binary gray cast irons are formed.*

**Keywords.** Grey cast iron, secondary transformations, nanostructural processes, crystallization centers, microcrystals, nanocrystals.

**For citation.** Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Secondary transformations in the structure of grey cast iron. Foundry production and metallurgy, 2024, no.3, pp. 57–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-57-60>.

При температурах выше 738 °С в структуре серых чугунов происходят превращения согласно следующей реакции [1]:



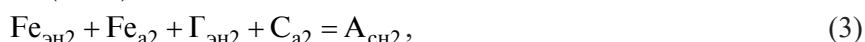
где  $A_{\text{МК1}}$  и  $A_{\text{МК2}}$  – микрокристаллы аустенита с различной концентрацией углерода;  $\Gamma_{\text{МК1}}$  – микрокристаллы графита.

Микрокристаллы аустенита  $A_{\text{МК1}}$  имеют следующую структуру [2]:



где  $\text{Fe}_{\text{ЭН1}}$  и  $\Gamma_{\text{ЭН1}}$  – элементарные нанокристаллы железа и графита;  $\text{Fe}_{\text{а1}}$  и  $\text{C}_{\text{а1}}$  – свободные атомы железа и углерода.

При реакции (1)  $A_{\text{МК1}}$  распадаются согласно (2). Тогда образование  $A_{\text{МК2}}$  является наноструктурным кристаллизационным процессом и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ( $A_{\text{СН2}}$ ) по реакции:



где  $Fe_{эн2}$  и  $\Gamma_{эн2}$  – элементарные нанокристаллы железа и графита;  $Fe_{a2}$  и  $C_{a2}$  – свободные атомы железа и углерода.

Затем образуются центры кристаллизации ( $A_{цк2}$ ) по реакции:



Заканчивается процесс формирования  $A_{мк2}$  по реакции:



Аналогично образование  $\Gamma_{мк1}$  происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ( $\Gamma_{сн1}$ ) по реакции:



где  $\Gamma_{эн3}$  и  $C_{a3}$  – элементарные нанокристаллы графита и свободные атомы углерода.

Затем образуются центры кристаллизации ( $\Gamma_{цк1}$ ) по реакции:



Заканчивается процесс формирования  $\Gamma_{мк1}$  по реакции:



При этом справедливы уравнения:



При температуре 727 °С в структуре серого чугуна происходит превращение согласно следующей эвтектоидной реакции [1]:



где  $A_{мк3}$ ,  $\Phi_{мк1}$  и  $\Pi_{мк1}$  – микрокристаллы аустенита, феррита и цементита.

Микрокристаллы аустенита  $A_{мк3}$  имеют следующую структуру [2]:



где  $Fe_{эн4}$  и  $\Gamma_{эн4}$  – элементарные нанокристаллы железа и графита;  $Fe_{a3}$  и  $C_{a4}$  – свободные атомы железа и углерода.

При реакции (10)  $A_{мк3}$  распадаются согласно (11). Тогда образование  $\Phi_{мк1}$  является наноструктурным кристаллизационным процессом и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ( $\Phi_{сн1}$ ) по реакции:



где  $Fe_{эн4}$  и  $\Gamma_{эн5}$  – элементарные нанокристаллы железа и графита;  $Fe_{a4}$  и  $C_{a5}$  – свободные атомы железа и углерода.

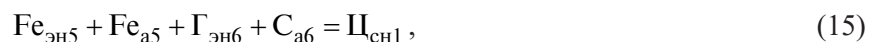
Затем образуются центры кристаллизации ( $\Phi_{цк1}$ ) по реакции:



Заканчивается процесс формирования  $\Phi_{мк1}$  по реакции:



Аналогично, образование  $\Pi_{мк1}$  происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ( $\Pi_{сн1}$ ) по реакции:



где  $Fe_{эн5}$  и  $\Gamma_{эн6}$  – элементарные нанокристаллы железа и графита;  $Fe_{a5}$  и  $C_{a6}$  – свободные атомы железа и углерода.

Затем образуются центры кристаллизации ( $\Pi_{цк1}$ ) по реакции:



Заканчивается процесс формирования  $\Pi_{\text{МК1}}$  по реакции:



При этом справедливы уравнения:

$$\begin{aligned} \text{Fe}_{\text{ЭН3}} &= \text{Fe}_{\text{ЭН4}} + \text{Fe}_{\text{ЭН5}}, \\ \text{Fe}_{\text{а3}} &= \text{Fe}_{\text{а4}} + \text{Fe}_{\text{а5}}, \\ \Gamma_{\text{ЭН4}} &= \Gamma_{\text{ЭН5}} + \Gamma_{\text{ЭН6}}, \\ \text{C}_{\text{а4}} &= \text{C}_{\text{а5}} + \text{C}_{\text{а6}}. \end{aligned} \quad (18)$$

При температуре 738 °С в структуре серого чугуна происходит превращение согласно следующей эвтектоидной реакции [1]:



где  $\text{A}_{\text{МК4}}$ ,  $\Phi_{\text{МК2}}$  и  $\Gamma_{\text{МК2}}$  – микрокристаллы аустенита, феррита и графита.

Микрокристаллы аустенита  $\text{A}_{\text{МК4}}$  имеют следующую структуру [2]:



где  $\text{Fe}_{\text{ЭН6}}$  и  $\Gamma_{\text{ЭН7}}$  – элементарные нанокристаллы железа и графита;  $\text{Fe}_{\text{а6}}$  и  $\text{C}_{\text{а7}}$  – свободные атомы железа и углерода.

При реакции (19)  $\text{A}_{\text{МК4}}$  распадаются согласно (20). Тогда образование  $\Phi_{\text{МК2}}$  является наноструктурным кристаллизационным процессом и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ( $\Phi_{\text{СН2}}$ ) по реакции:



где  $\text{Fe}_{\text{ЭН7}}$  и  $\Gamma_{\text{ЭН8}}$  – элементарные нанокристаллы железа и графита;  $\text{Fe}_{\text{а7}}$  и  $\text{C}_{\text{а8}}$  – свободные атомы железа и углерода.

Затем образуются центры кристаллизации ( $\Phi_{\text{ЦК2}}$ ) по реакции:



Заканчивается процесс формирования  $\Phi_{\text{МК2}}$  по реакции:



Аналогично образование  $\Gamma_{\text{МК2}}$  происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ( $\Gamma_{\text{СН2}}$ ) по реакции:



где  $\Gamma_{\text{ЭН9}}$  и  $\text{C}_{\text{а9}}$  – элементарные нанокристаллы графита и свободные атомы углерода.

Затем образуются центры кристаллизации ( $\Gamma_{\text{ЦК2}}$ ) по реакции:



Заканчивается процесс формирования  $\Gamma_{\text{МК2}}$  по реакции:



При этом справедливы уравнения:

$$\begin{aligned} \text{Fe}_{\text{ЭН6}} &= \text{Fe}_{\text{ЭН7}}, \\ \text{Fe}_{\text{а6}} &= \text{Fe}_{\text{а7}}, \\ \Gamma_{\text{ЭН7}} &= \Gamma_{\text{ЭН8}} + \Gamma_{\text{ЭН9}}, \\ \text{C}_{\text{а7}} &= \text{C}_{\text{а8}} + \text{C}_{\text{а9}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Таким образом, механизм вторичных превращений в структуре серых чугунов является наноструктурным, в котором основную роль играют элементарные нанокристаллы железа и графита, структурообразующие нанокристаллы аустенита, феррита, цементита и 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. **Марукович, Е. И.** Влияние газов на кристаллизацию углеродистых сталей / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литейное производство. – 2023. – № 6. – С. 7–10.
3. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 13–19.

## REFERENCES

1. **Vozdvizhenskij V. M., Grachev V. A., Spasskij 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. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Vliyanie gazov na kristallizaciyu uglerodistykh stalej [The effect of gases on the crystallization of carbon steels]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 2023, no. 6, pp. 7–10.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnaya kristallizaciya litejnyh splavov [Nanostructural crystallization of foundry alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.