



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-27-29>  
УДК 621.745.35

Поступила 08.06.2022  
Received 08.06.2022

## НАНОСТРУКТУРНАЯ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ 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 перекристаллизация железоуглеродистых сплавов является наноструктурным процессом. Микрокристаллы вторичного цементита сталей и чугунов формируются из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов графита и железоуглеродных комплексов. Микрокристаллы первичного  $\alpha$ -феррита сталей образуются из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа. Микрокристаллы вторичного графита чугунов формируются из элементарных нанокристаллов и свободных атомов графита. Микрокристаллы эвтектоида образуются из элементарных нанокристаллов железа и углерода, свободных атомов железа и углерода, железоуглеродных комплексов.*

**Ключевые слова.** *Сталь, чугун, перекристаллизация, наноструктурный процесс, нанокристаллы, свободные атомы, микрокристаллы, железоуглеродные комплексы.*

**Для цитирования.** *Марукович, Е. И. Наноструктурная перекристаллизация железоуглеродистых сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 27–29. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-27-29>.*

## NANOSTRUCTURED RECRYSTALLIZATION OF IRON-CARBON 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.*

*Recrystallization of iron-carbon alloys has been shown to be a nanostructured process. Microcrystals of secondary cementite of steels and cast iron are formed from elementary nanocrystals of iron and graphite, free atoms of graphite and iron-carbon complexes. Microcrystals of primary  $\alpha$ -ferrite steels are formed from elementary nanocrystals of iron and graphite, free iron atoms. Microcrystals of cast iron secondary graphite are formed from elementary nanocrystals and free graphite atoms. Eutectoid microcrystals are formed from elementary nanocrystals of iron and carbon, free atoms of iron and carbon, iron-carbon complexes.*

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

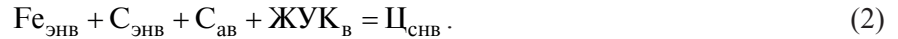
**For citation.** *Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Nanostructured recrystallization of iron-carbon alloys. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 27–29. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-27-29>.*

Металлический расплав является наноструктурной системой, а кристаллизация металлов и железоуглеродистых сплавов – наноструктурным процессом [1–3]. Микрокристаллы аустенита стали ( $A_{\text{MKC}}$ ) формируются из элементарных нанокристаллов железа ( $Fe_{\text{ЭН}}$ ), элементарных нанокристаллов графита ( $C_{\text{ЭН}}$ ), свободных атомов железа ( $Fe_a$ ) и железоуглеродных комплексов (ЖУК) [3]. Этот процесс можно выразить реакцией:



При охлаждении  $A_{\text{MKC}}$  с содержанием углерода от 9 до 3,5 ат. % ниже линии *ES* диаграммы состояния «железо – углерод» ЖУК частично распадается на свободные атомы графита и железа, которые взаимодействуют с компонентами  $A_{\text{MKC}}$ . В результате из него образуются микрокристаллы вторичного цементита ( $\Pi_{\text{МКВ}}$ ) [4, 5]. Они формируются из выделившихся вторичных элементарных нанокристаллов железа ( $Fe_{\text{ЭНВ}}$ ), вторичных элементарных нанокристаллов графита ( $C_{\text{ЭНВ}}$ ), вторичных свободных ато-

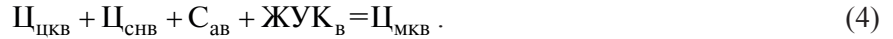
мов графита ( $C_{ав}$ ) и вторичных железоуглеродных комплексов ( $ЖУК_B$ ) следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы вторичного цементита ( $\Pi_{снв}$ ) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации вторичного цементита ( $\Pi_{цкв}$ ):

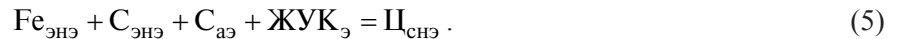


Заканчивается процесс образованием  $\Pi_{мкв}$  по реакции:



После выделения вторичного цементита концентрация углерода в аустените стали уменьшается до 3,5 ат.%. После этого происходит эвтектоидная реакция: микрокристаллы эвтектоидного аустенита ( $A_{мкэ}$ ) распадаются на эвтектоидные элементарные нанокристаллы железа ( $Fe_{энэ}$ ), эвтектоидные элементарные нанокристаллы графита ( $C_{энэ}$ ), эвтектоидные свободные атомы графита ( $C_{аэ}$ ), эвтектоидные железоуглеродные комплексы ( $ЖУК_э$ ), эвтектоидные свободные атомы железа ( $Fe_{аэ}$ ), и из них совместно формируются микрокристаллы эвтектоидного цементита ( $\Pi_{мкэ}$ ) и микрокристаллы эвтектоидного  $\alpha$ -феррита ( $\Phi_{мкэ}$ ).

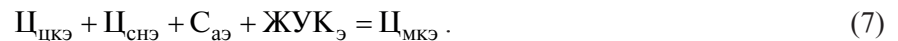
Образование  $\Pi_{мкэ}$  происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы эвтектоидного цементита ( $\Pi_{снэ}$ ) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации эвтектоидного цементита ( $\Pi_{цкэ}$ ):



Заканчивается процесс формированием  $\Pi_{мкэ}$  по реакции:



$\Phi_{мкэ}$  содержит 0,1 ат.% углерода [4]. Поэтому образование  $\Phi_{мкэ}$  происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы эвтектоидного  $\alpha$ -феррита ( $\Phi_{снэ}$ ) по следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации эвтектоидного  $\alpha$ -феррита ( $\Phi_{цкэ}$ ):



Заканчивается процесс формированием  $\Phi_{мкэ}$  по реакции:



При охлаждении эвтектоида из  $\Phi_{снэ}$  выделяются  $C_{эн}$ , которые присоединяются с помощью  $C_{аэ}$  к  $\Pi_{мкэ}$ . В результате концентрация углерода в эвтектоидном  $\alpha$ -феррите уменьшается согласно диаграмме состояния «железо – углерод» [4].

При охлаждении стали с содержанием углерода от 0,5 до 3,5 ат.% ниже линии  $GS$  на диаграмме состояния «железо – углерод»  $ЖУК$  аустенита частично распадается на свободные атомы железа и графита. Они вступают в реакцию с компонентами  $A_{мкс}$ . В результате образуются и выделяются первичные элементарные нанокристаллы железа ( $Fe_{эпп}$ ) и первичные свободные атомы железа ( $Fe_{ап}$ ). Из них формируются микрокристаллы первичного  $\alpha$ -феррита ( $\Phi_{мкп}$ ).

Согласно диаграмме состояния «железо – углерод», в  $\Phi_{мкп}$  должен находиться углерод [4]. Это обеспечивается тем, что в структуру  $\Phi_{мкп}$  встраиваются первичные нанокристаллы графита ( $C_{эпп}$ ), которые выделяются из аустенита. Тогда образование  $\Phi_{мкп}$  можно представить следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы первичного  $\alpha$ -феррита ( $\Phi_{спп}$ ) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации первичного  $\alpha$ -феррита ( $\Phi_{цкп}$ ):



Заканчивается процесс формированием  $\Phi_{мкп}$  по реакции:



Выделение  $\Phi_{\text{МКП}}$  повышает концентрацию углерода в аустените стали до 3,5 ат. %. Последний затем превращается в  $A_{\text{МКЭ}}$ . Его распад при эвтектоидной реакции происходит по реакциям (5) – (10).

Микрорекристаллы аустенита чугуна образуются из  $\text{Fe}_{\text{ЭН}}$ , ЖУК и элементарных нанокристаллов графита ( $\text{C}_{\text{ЭН}}$ ). Этот процесс можно выразить уравнением [3]:



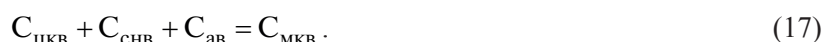
При охлаждении аустенита чугуна с содержанием углерода от 9 до 3,5 ат. % ниже линии  $ES$  на диаграмме состояния «железо – углерод» ЖУК частично распадается на свободные атомы железа и углерода. При их взаимодействии с аустенитом могут образовываться вторичные микрорекристаллы цементита или вторичные микрорекристаллы графита ( $\text{C}_{\text{МКВ}}$ ). Первые выделяются, если при эвтектической реакции формируется аустенитно-цементитная эвтектика, вторые – если образуется аустенитно-графитная эвтектика [5].  $\Pi_{\text{МКВ}}$  формируется по реакциям (2) – (4).  $\text{C}_{\text{МКВ}}$  образуются из выделяющихся элементарных нанокристаллов вторичного графита ( $\text{C}_{\text{ЭНВ}}$ ) и свободных атомов вторичного графита ( $\text{C}_{\text{АВ}}$ ) следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы вторичного графита ( $\text{C}_{\text{СНВ}}$ ) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации вторичного графита ( $\text{C}_{\text{ЦКВ}}$ ):



Заканчивается процесс формирования  $\text{C}_{\text{МКВ}}$  по реакции:



Выделения  $\text{C}_{\text{МКВ}}$  или  $\Pi_{\text{МКВ}}$  снижают концентрацию углерода в аустените чугуна до 3,5 ат. %. Последний становится затем  $A_{\text{МКЭ}}$ . Его распад при эвтектоидной реакции происходит по реакциям (5) – (10). Но если скорость эвтектоидной реакции мала, то распад  $A_{\text{МКЭ}}$  может произойти с образованием  $\Phi_{\text{МКЭ}}$  и микрорекристаллов эвтектоидного графита ( $\text{C}_{\text{МКЭ}}$ ). При этом все ЖУК,  $A_{\text{МКЭ}}$  распадаются на  $\text{C}_{\text{АЭ}}$  и  $\text{Fe}_{\text{АЭ}}$ .

$\text{C}_{\text{МКЭ}}$  формируются следующим образом. Сначала образуются структурообразующие нанокристаллы эвтектоидного графита ( $\text{C}_{\text{СНЭ}}$ ) по реакции:



Затем формируются центры кристаллизации эвтектоидного графита ( $\text{C}_{\text{ЦКЭ}}$ ):



Заканчивается процесс образованием  $\text{C}_{\text{МКЭ}}$  по реакции:



## ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Наноструктурная теория металлических расплавов // *Литье и металлургия*. 2020. № 3. С. 7–9.
2. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Наноструктурная кристаллизация металлов // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 23–26.
3. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. Кристаллизация железоуглеродистых сплавов – наноструктурный процесс // *Металлургия машиностроения*. 2022. № 2. С. 20–22.
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.

## REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Kristallizatsiya zhelezo-uglerodistykh splavov – nanostrukturnyj process [Crystallization of iron-carbon alloys – nanostructured process]. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of Machinery Building*, 2022, no. 2, pp. 20–22.
4. *Diagrammy sostoyaniya dvoynnyh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza: spravochnik* [Status diagrams of dual and multi-component iron-based systems: Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
5. Livshits B. G. *Metallografiya. Uchebnik dlya vuzov* [Metallography. Textbook for universities]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 236 p.