



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-13-15>
УДК 621.745.35

Поступила 03.01.2024
Received 03.01.2024

МЕХАНИЗМ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

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, Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь, пр. Мира, 43

Разработан наноструктурный механизм перекристаллизации углеродистых сталей. Сначала из элементарных нанокристаллов железа и графита, свободных атомов железа и углерода образуются структурообразующие нанокристаллы аустенита, феррита и цементита. Из них формируются центры кристаллизации микрокристаллов фаз. Затем из этих центров, структурообразующих нанокристаллов фаз, свободных атомов железа и углерода образуются микрокристаллы аустенита, феррита и цементита углеродистых сталей.

Ключевые слова. Углеродистые стали, перекристаллизация, наноструктурные процессы, центры кристаллизации, микрокристаллы, нанокристаллы.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Механизм перекристаллизации углеродистых сталей / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2024. № 1. С. 13–15. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-13-15>.

THE MECHANISM OF RECRYSTALLIZATION OF CARBON STEELS

E. I. MARUKOVICH, V. Yu. STETSENKO, Association of Foundrymen and Metallurgists of Belarus, Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolasa str. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

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

A nanostructural mechanism for recrystallization of carbon steels has been developed. First, structure-forming nanocrystals of austenite, ferrite and cementite are formed from elementary nanocrystals of iron and graphite, free iron and carbon atoms. 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 and cementite of carbon steels are formed.

Keywords. Carbon steels, recrystallization, nanostructural processes, crystallization centers, microcrystals, nanocrystals.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. The mechanism of recrystallization of carbon steels. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 1, pp. 13–15. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-13-15>.

При температурах выше 727 °С перекристаллизация углеродистых сталей, содержащих до 0,8% углерода, происходит согласно реакции [1]

$$A_{\text{МК1}} = \Phi_{\text{МК1}} + A_{\text{МК2}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{МК1}}$, $A_{\text{МК2}}$ – микрокристаллы аустенита с различной концентрацией углерода; $\Phi_{\text{МК1}}$ – микрокристаллы феррита.

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

$$A_{\text{МК1}} = \text{Fe}_{\text{ЭН1}} + \text{Fe}_{\text{а1}} + \Gamma_{\text{ЭН1}} + \text{C}_{\text{а1}}, \quad (2)$$

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 $\Phi_{\text{МК1}}$ является наноструктурным кристаллизационным процессом и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\Phi_{\text{СН1}}$)

$$\text{Fe}_{\text{ЭН2}} + \text{Fe}_{\text{а2}} + \Gamma_{\text{ЭН2}} + \text{C}_{\text{а2}} = \Phi_{\text{СН1}}, \quad (3)$$

где $\text{Fe}_{\text{ЭН2}}$ и $\Gamma_{\text{ЭН2}}$ – элементарные нанокристаллы железа и графита; $\text{Fe}_{\text{а2}}$ и $\text{C}_{\text{а2}}$ – свободные атомы железа и углерода.

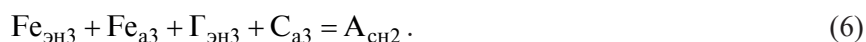
Затем образуются центры кристаллизации ($\Phi_{\text{ЦК1}}$)

$$\Phi_{\text{СН1}} + \text{Fe}_{\text{а2}} + \text{C}_{\text{а2}} = \Phi_{\text{ЦК1}}. \quad (4)$$

Заканчивается процесс формирования $\Phi_{\text{МК1}}$ реакцией



Аналогично происходит образование $\text{А}_{\text{МК2}}$. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\text{А}_{\text{СН2}}$)



Затем образуются центры кристаллизации ($\text{А}_{\text{МК2}}$)



Заканчивается процесс формирования $\text{А}_{\text{МК2}}$ реакцией



При этом справедливы следующие уравнения:

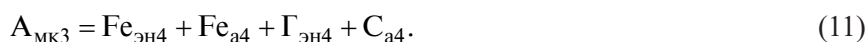


При температуре 727 °С перекристаллизация углеродистой стали, содержащей 0,8% углерода, происходит при эвтектоидной реакции [1]



где $\text{А}_{\text{МК3}}$, $\Phi_{\text{МК2}}$ и $\Pi_{\text{МК1}}$ – микрокристаллы аустенита, феррита и цементита соответственно.

Микрокристаллы аустенита $\text{А}_{\text{МК3}}$ имеют структуру [2]



При реакции (10) $\text{А}_{\text{МК3}}$ распадаются согласно (11). Тогда образование $\Phi_{\text{МК2}}$ является наноструктурным кристаллизационным процессом и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\Phi_{\text{СН2}}$)



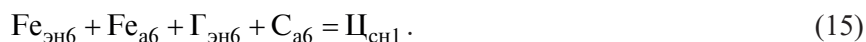
Затем образуются центры кристаллизации ($\Phi_{\text{МК2}}$)



Заканчивается процесс формирования $\Phi_{\text{МК2}}$ реакцией



Аналогично при образовании $\Pi_{\text{МК1}}$ сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\Pi_{\text{СН1}}$)



Затем образуются центры кристаллизации ($\Pi_{\text{МК1}}$)



Заканчивается процесс формирования $\Pi_{\text{МК1}}$ реакцией



При этом справедливы уравнения:



При температурах выше 727 °С перекристаллизация углеродистых сталей, содержащих более 0,8% углерода, происходит согласно реакции [1]



где $\text{А}_{\text{МК4}}$, $\text{А}_{\text{МК5}}$ – микрокристаллы аустенита с различной концентрацией углерода; $\Pi_{\text{МК2}}$ – микрокристаллы цементита.

Микрорекристаллы аустенита $A_{\text{МК4}}$ имеют структуру [2]

$$A_{\text{МК4}} = \text{Fe}_{\text{ЭН7}} + \text{Fe}_{\text{а7}} + \Gamma_{\text{ЭН7}} + C_{\text{а7}}. \quad (20)$$

При реакции (19) $A_{\text{МК4}}$ распадаются согласно (20). Тогда образование $A_{\text{МК5}}$ является наноструктурным кристаллизационным процессом и происходит следующим образом [3]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($A_{\text{СН5}}$)

$$\text{Fe}_{\text{ЭН8}} + \text{Fe}_{\text{а8}} + \Gamma_{\text{ЭН8}} + C_{\text{а8}} = A_{\text{СН5}}. \quad (21)$$

Затем образуются центры кристаллизации ($A_{\text{ЦК5}}$)

$$A_{\text{СН5}} + \text{Fe}_{\text{а8}} + C_{\text{а8}} = A_{\text{ЦК5}}. \quad (22)$$

Заканчивается процесс формирования $A_{\text{МК5}}$ реакцией

$$A_{\text{ЦК5}} + A_{\text{СН5}} + \text{Fe}_{\text{а8}} + C_{\text{а8}} = A_{\text{МК5}}. \quad (23)$$

Аналогично происходит образование $\Pi_{\text{МК2}}$. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\Pi_{\text{СН2}}$)

$$\text{Fe}_{\text{ЭН9}} + \text{Fe}_{\text{а9}} + \Gamma_{\text{ЭН9}} + C_{\text{а9}} = \Pi_{\text{СН2}}. \quad (24)$$

Затем образуются центры кристаллизации ($\Pi_{\text{ЦК2}}$)

$$\Pi_{\text{СН2}} + \text{Fe}_{\text{а9}} + C_{\text{а9}} = \Pi_{\text{ЦК2}}. \quad (25)$$

Заканчивается процесс формирования $\Pi_{\text{МК2}}$ реакцией

$$\Pi_{\text{ЦК2}} + \Pi_{\text{СН2}} + \text{Fe}_{\text{а9}} + C_{\text{а9}} = \Pi_{\text{МК2}}. \quad (26)$$

При этом справедливы уравнения:

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

Таким образом, механизм перекристаллизации углеродистых сталей является наноструктурным, в котором основную роль играют элементарные нанокристаллы железа и графита, структурообразующие нанокристаллы аустенита, феррита и цементита.

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, Mashinostroyeniye Publ., 1984, 432 p.
2. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Vliyaniye gazov na kristallizatsiyu uglerodistykh stalej [Effect of gases on carbon steels crystallization]. *Litejnoye proizvodstvo = Foundry. Technologies and equipment*, 2023, no. 6, pp. 7–10.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnaya kristallizatsiya litejnykh splavov [Nanostructural crystallization of casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.