



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-23-25>
УДК 621.745.35

Поступила 22.02.2022
Received 22.02.2022

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ УГЛЕРОДА В АУСТЕНИТЕ Fe-C 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

На основании расчетов модели элементарной кристаллической ячейки γ -железа показано, что в ее открытых порах не могут находиться ионы углерода. Углерод в Fe-C-сплавах растворяется и распределяется в основном в виде элементарных нанокристаллов графита. В аустените стали углерод находится в элементарных нанокристаллах графита и железо-углеродных комплексах. В аустените чугуна углерод присутствует в элементарных нанокристаллах графита.

Ключевые слова. Углерод, графит, атомы, ионы, аустенит, сталь, чугун, нанокристаллы, железо-углеродные комплексы.
Для цитирования. Марукович, Е. И. О распределении углерода в аустените Fe-C-сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2022. № 2. С. 23-25. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-23-25>.

ON CARBON DISTRIBUTION IN AUSTENITE Fe-C 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.

Based on the calculations of the model of the elementary crystal cell γ -iron, it is shown that carbon ions cannot be present in its open pores. Carbon in Fe-C alloys dissolves and distributes mainly as elementary graphite nanocrystals. In steel austenite, carbon is found in elementary graphite nanocrystals and in iron-carbon complexes. In cast iron austenite, carbon is found in elementary graphite nanocrystals.

Keywords. Carbon, graphite, atoms, ions, austenite, steel, cast iron, nanocrystals, iron-carbon complexes.
For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. On carbon distribution in austenite Fe-C alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 23-25. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-2-23-25>.

От распределения углерода в аустените Fe-C-сплавов во многом зависят свойства сталей и чугунов. Принято считать, что углерод в Fe-C-сплавах растворяется и распределяется в атомарном виде, образуя твердый раствор внедрения в кристаллической решетке γ -железа (γ -Fe) [1–4]. При этом выполняется уравнение:

$$d_{\text{п}\gamma 1} = 0,41d_{\gamma}, \quad (1)$$

где $d_{\text{п}\gamma 1}$ – диаметр сферы, вписанной в пору, находящуюся в центре элементарной ячейки γ -Fe; d_{γ} – диаметр атома железа γ -Fe.

Известно, что $d_{\gamma} = 0,257$ нм [5]. Тогда $d_{\text{п}\gamma 1}$, согласно уравнению (1), равно 0,105 нм.

Чтобы атом углерода внедрился в γ -Fe, необходимо, чтобы диаметр атома углерода (d_c) не превышал 0,105 нм. Но из справочных данных известно, что $d_c = 154$ нм [5]. Поскольку $d_c > d_{\text{п}\gamma 1}$, то принято считать, что атомы углерода в γ -Fe находятся в ионизированном виде [6, 7]. Если атомы углерода отдают свои электроны в коллективизированную зону проводимости γ -Fe и входят в поры его кристаллической структуры, то это должно способствовать увеличению электропроводности γ -Fe. В действительности даже малые концентрации углерода значительно снижают электропроводность железа. Кроме того, известно, что на один атом γ -Fe приходится одна пора с $d_{\text{п}\gamma 1}$ [1]. Если бы ионы углерода занимали все эти поры, то его максимальная концентрация в γ -Fe была равна 50 ат. %. В действительности она составляет всего 9 ат. % [6]. Поэтому целью настоящей работы является определение возможного места нахождения атомов углерода в γ -Fe. Для этого необходимо исследовать элементарную ячейку γ -Fe.

Данную работу выполняли на модели. Атомы железа моделировали пенопластовыми шариками диаметром 40 мм каждый. Расстояния между ними выбирали в соответствующем масштабе исходя из



Рис. 1. Общий вид модели элементарной кристаллической ячейки γ -железа

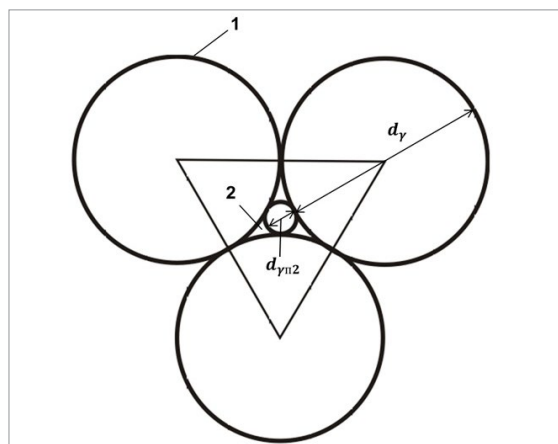


Рис. 2. Схема открытой поры элементарной кристаллической ячейки γ -железа: 1 – атом железа; 2 – пора

определяющего размера элементарной ячейки γ -Fe $a=0,364$ нм [5]. Общий вид модели представлен на рис. 1. Из рисунка видно, что центральная пора элементарной ячейки γ -Fe является изолированной. Поэтому ион углерода не может в нее попасть и там находиться. Но в элементарной ячейке γ -Fe есть и открытые поры (рис. 1). Схематично вид такой поры показан на рис. 2. Из рисунка следует, что диаметр сферы, вписанной в открытую пору элементарной ячейки γ -Fe ($d_{\gamma n2}$), выражается следующим уравнением:

$$d_{\gamma n2} = 0,156d_{\gamma}. \quad (2)$$

Поскольку $d_{\gamma} = 0,257$ нм, то $d_{\gamma n2} = 0,040$ нм.

Известно, что растворимость углерода в α -железе составляет всего 0,1 ат.% [6]. Считают, что атомы углерода не растворяются в кристаллической решетке α -железа (α -Fe) [2, 7, 8]. При этом выполняется уравнение:

$$d_{\alpha n} = 0,29d_{\alpha}, \quad (3)$$

где $d_{\alpha n}$ – диаметр сферы, вписанной в пору элементарных ячеек α -Fe; d_{α} – диаметр атома железа α -Fe. Известно, что $d_{\alpha} = 0,248$ нм [5]. Тогда $d_{\alpha n}$, согласно уравнению (3), равно 0,072 нм. Поскольку $d_{\alpha n} > d_{\gamma n2}$, то ионы углерода не смогут попасть в поры элементарных ячеек γ -Fe. Также не могут 9 ат.% ионов углерода находиться в вакансиях γ -Fe, поскольку их атомная концентрация намного меньше углеродной. Известно, что в металлах и сплавах концентрация вакансий вблизи точки плавления составляет 0,1–0,01 ат.% [9]. Тогда возникает вопрос: где и как распределяется углерод в аустените Fe-C-сплавов? Для ответа на этот вопрос необходимо исследовать процессы растворения графита в жидком железе и кристаллизацию аустенита в стали и чугуне.

Молярная энтальпия плавления железа составляет только 3% от его молярной энтальпии атомизации [10]. Поэтому при плавлении железа происходит реакция:



где $\text{Fe}_{\text{мк}}$, $\text{Fe}_{\text{эн}}$, $\text{Fe}_{\text{а}}$ – соответственно микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы железа. Расчетное значение диаметра элементарного нанокристалла железа составляет 6,6 нм [13].

Сталь и чугун можно получать растворением графита в расплаве железа или Fe-C-сплава. При этом молярная энтальпия растворения графита составляет 10% от молярной энтальпии атомизации графита [10, 11]. Поэтому при растворении графита происходит реакция, аналогичная (4):



где $\text{C}_{\text{мк}}$, $\text{C}_{\text{эн}}$, $\text{C}_{\text{а}}$ – соответственно микрокристаллы, элементарные нанокристаллы и свободные атомы графита (углерода).

При растворении графита в жидком железе происходит взаимодействие $\text{Fe}_{\text{а}}$ с $\text{C}_{\text{а}}$. В результате образуются железо-углеродные комплексы (ЖУК). Тогда микрокристаллы графита в расплаве железа будут распадаться на элементарные нанокристаллы по следующей реакции:



Элементарными ЖУК являются соединения Fe_3C .

Кристаллизация металлов и сплавов является наноструктурным процессом [14]. Тогда процесс кристаллизации аустенита в стали можно выразить следующим уравнением:



где $\text{A}_{\text{МКС}}$ – микрокристаллы аустенита в стали.

В расплаве чугуна, который кристаллизуется по стабильной диаграмме состояния Fe-C, образование микрокристаллов графита ($\text{C}_{\text{МК}}$) происходит по реакции:



Микрокристаллы аустенита в чугуне ($\text{A}_{\text{МКЧ}}$) формируются по реакции:



Из уравнений (7) и (9) следует, что углерод не входит в γ -Fe. В аустените Fe-C-сплавов углерод находится в основном в элементарных нанокристаллах графита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лившиц Б. Г. *Металлография*: учеб. для вузов. М.: Metallurgiya, 1990. 336 с.
2. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. *Материаловедение*: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
3. Новиков И. И., Золоторевский В. С., Портной В. К. и др. *Металловедение*. М.: Издательский Дом МИСиС, 2009, Т. 1. 496 с.
4. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. *Материаловедение*: учеб. для вузов. СПб.: Химиздат, 2017. 784 с.
5. Свойства элементов: справ. / Под ред. М. Е. Дрица. М.: Metallurgiya, 1985. 672 с.
6. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / Под ред. О. А. Банньих и М. Е. Дрица. М.: Metallurgiya, 1986. 440 с.
7. Гуляев А. П. *Металловедение*: учеб. для вузов. М.: Metallurgiya, 1986. 544 с.
8. Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. *Основы металлографии чугуна*. М.: Metallurgiya, 1969. 416 с.
9. Физическое металловедение. Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами / Под ред. Р. У. Кана и П. Хаазена. М.: Metallurgiya, 1987. Т. 2. 624 с.
10. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: справ. / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Metallurgiya, 1976. 660 с.
11. 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.
12. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. *Наноструктурная теория металлических расплавов // Литье и металлургия*. 2020. № 3. С. 7–9.
13. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. *Расчет параметров элементарных нанокристаллов жидких металлов при температуре плавления // Литье и металлургия*. 2021. № 4. С. 16–18.
14. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Стеценко А. В. *Наноструктурная кристаллизация металлов // Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 23–26.

REFERENCES

1. Livshic B. G. *Metallografiya* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 336 p.
2. Lahtin Yu. M., Leont'eva V. P. *Materialovedenie*. [Materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 528 p.
3. Novikov I. I., Zolotarevskij V. S., Portnoj V. K. *Metallovedenie* [Metallurgical Science]. Vol. 1. Moscow, Izdatel'skij Dom MISiS Publ., 2009, 496 p.
4. Solncev Yu. P., Pryahin E. I. *Materialovedenie* [Materials Science]. St. Petersburg, Himizdat Publ., 2017. 784 p.
5. *Svoystva elementov. Spravochnik* [Item Properties. Reference]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 672 p.
6. *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.
7. Gulyaev A. P. *Metallovedenie* [Metal Science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 544 p.
8. Bunin K. P., Malinochka Ya. N., Taran Yu. N. *Osnovy metallografii chuguna* [Basics of metallography of cast iron]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 416 p.
9. *Fizicheskoe metallovedenie. Fazovye prevrashcheniya v metallah i splavah i splavy s osobymi fizicheskimi svoystvami* [Physical metal science. Phase transformations in metals and alloys and alloys with special physical properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, vol. 2, 624 p.
10. *Svoystva elementov. Ch. 1. Fizicheskie svoystva* [Item Properties. Part 1. Physical Properties]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
11. Zaharchenko E. V., Levchenko Yu. N., Gorenko V. G. *Otlivki iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom* [Cast iron castings with spherical and vermicular graphite]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986, 248 p.
12. 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.
13. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Raschet parametrov elementarnyh nanokristallov zhidkih metallov pri temperature plavleniya* [Calculation of parameters of elementary nanocrystals of liquid metals at melting temperature]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 16–18.
14. 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.