



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-41-44>
УДК 621.745.35

Поступила 02.09.2024
Received 02.09.2024

СТРУКТУРНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ ПРИ ЛИТЬЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ 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

Показано, что эффект структурной наследственности при литье эвтектических чугунов можно объяснить с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов. Предложен механизм структурной наследственности при литье эвтектических чугунов. Этот механизм определяется устойчивостью центров кристаллизации микрокристаллов аустенита, графита, цементита. Показано, что устойчивость зависит от концентрации адсорбированных атомов кислорода. Чем выше концентрация, тем менее устойчивы центры кристаллизации микрокристаллов аустенита, графита, цементита в расплавах эвтектических чугунов, и наоборот. При увеличении перегревов и (или) времени выдержки расплавов в них повышается концентрация адсорбированных атомов кислорода. В результате снижается структурная устойчивость при переплавке эвтектических чугунов и нарушается эффект структурной наследственности.

Ключевые слова. Структурная наследственность, литье, чугуны, центры кристаллизации, адсорбция, нанокристаллы, атомы кислорода.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Структурная наследственность при литье эвтектических чугунов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 41–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-41-44>.

STRUCTURAL HEREDITY IN THE CASTING OF EUTECTIC 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.

It has been shown that the effect of structural inheritance in casting eutectic cast irons can be explained from the standpoint of nanostructured crystallization of foundry alloys. Proposed is a mechanism of structural heredity when casting eutectic cast irons. This mechanism is determined by the stability of the crystallization centers of microcrystals of austenite, graphite, cementite. This stability has been shown to depend on the concentration of adsorbed oxygen atoms. The higher this concentration, the less stable the centers of crystallization of microcrystals of austenite, graphite, cementite in melts of eutectic cast irons, and vice versa. With an increase in overheating and (or) the holding time of melts, the concentration of adsorbed oxygen atoms in them increases. As a result, structural stability during remelting of eutectic cast irons is reduced and the effect of structural heredity is disturbed.

Keywords. Structural heredity, casting, cast iron, crystallization centers, adsorption, nanocrystals, oxygen atoms.

For citation. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. Structural heredity in the casting of eutectic cast iron. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 3, pp. 41–44. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-41-44>.

При литье чугунов наибольшее применение получили эвтектические чугуны. По структуре и свойствам их можно разделить на серый эвтектический чугун (СЭЧ) и белый эвтектический чугун (БЭЧ).

При литье чугунов экспериментально установлено существование эффекта структурной наследственности [1, 2]. Он состоит в том, что при невысоком перегреве и (или) малом времени выдержки расплава структура получаемых литых заготовок определяется структурой шихтовых отливок, то есть наблюдается их структурное соответствие. Объяснить это явление с позиции классической теории кристаллизации металлических расплавов затруднительно, поскольку в ее основе лежит постулат о том, что центрами кристаллизации микрокристаллов фаз являются неметаллические включения или интерметаллиды. Но они при кристаллизации чугунов не удовлетворяют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского [3].

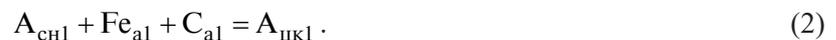
Объяснить эффект структурной наследственности при литье чугунов можно с позиции наноструктурной кристаллизации литейных сплавов [4]. Металлические расплавы являются равновесными наноструктурными системами [5]. Центры кристаллизации, состоящие из нанокристаллов фаз, удовлетворяют принципу структурного и размерного соответствия Данкова – Конобеевского, так как имеют одинаковую элементарную кристаллическую решетку с микрочастицами фаз. Эффективность структурной наследственности при литье сплавов определяется концентрацией центров кристаллизации, которые сохраняют стабильность при температурах выше температур ликвидуса [6]. Это и определяет структурную наследственность при литье чугунов. Разработка ее механизма является целью настоящей работы.

Структура СЭЧ, при его кристаллизации, определяется микрочастицами аустенита ($A_{МК1}$) и графита ($\Gamma_{МК}$). При плавлении, больших перегреве и времени выдержки расплава СЭЧ $A_{МК1}$ распадается на элементарные нанокристаллы железа ($Fe_{ЭН1}$) и графита ($\Gamma_{ЭН1}$), свободные атомы железа (Fe_{a1}) и углерода (C_{a1}).

Процесс кристаллизации $A_{МК1}$ является наноструктурным и происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($A_{СН1}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации ($A_{ЦК1}$) по реакции:



Заканчивается процесс кристаллизации $A_{МК1}$ по реакции:



Из реакций (1) – (3) следует, что структура СЭЧ будет определяться концентрацией $A_{ЦК1}$. Чем она выше, тем более дисперсной становится структура отливок при их кристаллизации. При невысоком перегреве и (или) малом времени выдержки расплава СЭЧ $A_{МК1}$ распадается в соответствии с реакцией, обратной (3).

Кислород и водород растворяются в жидком железе в атомарном виде [7]. Эти атомы образуются при взаимодействии расплава с молекулами кислорода и воды атмосферного воздуха. Стандартные теплоты адсорбции атомов водорода и кислорода на железе составляют соответственно 143 и 570 кДж/моль [8]. Поэтому на элементарных нанокристаллах железа в чугунах преимущественно будут адсорбироваться атомы кислорода. При этом они будут устойчивы в расплаве, так как стандартная теплота образования оксида FeO меньше стандартной теплоты адсорбции атомарного кислорода на железе [8, 9].

При увеличении перегрева и (или) времени выдержки расплава СЭЧ в нем повышается концентрация атомов кислорода [7]. Они адсорбируются $A_{ЦК1}$ до определенной, критической концентрации. При ее превышении происходит распад $A_{ЦК1}$ по эффекту Ребиндера в соответствии со следующей реакцией:



где $\{O\}$ – адсорбированные атомы кислорода.

Аналогичным образом распадается $A_{СН1}$, но при более высоком перегреве и (или) большем времени выдержки расплава СЭЧ.

При плавлении, больших перегреве и времени выдержки расплава СЭЧ $\Gamma_{МК}$ распадается на элементарные нанокристаллы графита ($\Gamma_{ЭН2}$) и свободные атомы углерода (C_{a2}). Процесс кристаллизации $\Gamma_{МК}$ является наноструктурным и происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\Gamma_{СН}$) по следующей реакции:



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



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



Из реакций (5) – (7) следует, что структура СЭЧ будет определяться концентрацией $\Gamma_{ЦК}$. Чем она выше, тем более дисперсной становится структура отливок при их кристаллизации. При невысоком перегреве и (или) малом времени выдержки расплава СЭЧ $\Gamma_{МК}$ распадается в соответствии с реакцией, обратной (7).

Стандартные теплоты адсорбции атомов водорода и кислорода на графите составляют соответственно 29 и 335 кДж/моль [10, 11]. Поэтому на элементарных нанокристаллах графита в чугунах преимущественно будут адсорбироваться атомы кислорода. При этом они будут устойчивы в расплаве, так как стандартная теплота образования оксида СО меньше стандартной теплоты адсорбции атомарного кислорода на графите [9, 11].

При увеличении перегрева и (или) времени выдержки расплава СЭЧ в нем повышается концентрация атомов кислорода [7]. Они адсорбируются $\Gamma_{\text{цк}}$ до определенной, критической концентрации. При ее превышении происходит распад $\Gamma_{\text{цк}}$ по эффекту Ребиндера в соответствии со следующей реакцией:



Аналогичным образом распадаются $\Gamma_{\text{сн}}$, но при более высоком перегреве и (или) большем времени выдержки расплава СЭЧ.

Структура БЭЧ, при его кристаллизации, определяется микрокристаллами аустенита ($A_{\text{МК2}}$) и цементита ($\Pi_{\text{МК}}$). При плавлении, больших перегреве и времени выдержки расплава БЭЧ $A_{\text{МК2}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы железа ($Fe_{\text{ЭН2}}$) и графита ($\Gamma_{\text{ЭН3}}$), свободные атомы железа (Fe_{a2}) и углерода (C_{a3}).

Процесс кристаллизации $A_{\text{МК2}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($A_{\text{сн2}}$) по реакции:



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

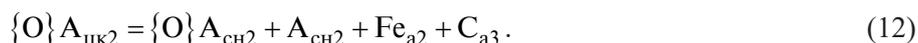


Заканчивается процесс кристаллизации $A_{\text{МК2}}$ по реакции:



Из реакций (9) – (11) следует, что структура БЭЧ будет определяться концентрацией $A_{\text{цк2}}$. Чем она выше, тем более дисперсной становится структура отливок при их кристаллизации. При невысоком перегреве и (или) малом времени выдержки расплава БЭЧ $A_{\text{МК2}}$ распадаются в соответствии с реакцией, обратной (11).

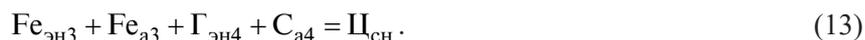
При увеличении перегрева и (или) времени выдержки расплава БЭЧ в нем повышается концентрация атомов кислорода [7]. Они адсорбируются $A_{\text{цк2}}$ до определенной, критической концентрации. При ее превышении происходит распад $A_{\text{цк2}}$ по эффекту Ребиндера в соответствии со следующей реакцией:



Аналогичным образом распадаются $A_{\text{сн2}}$, но при более высоком перегреве и (или) большем времени выдержки расплава БЭЧ.

При плавлении, больших перегреве и времени выдержки расплава БЭЧ $\Pi_{\text{МК}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы железа ($Fe_{\text{ЭН3}}$) и графита ($\Gamma_{\text{ЭН4}}$), свободные атомы железа (Fe_{a3}) и углерода (C_{a4}).

Процесс кристаллизации $\Pi_{\text{МК}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\Pi_{\text{сн}}$) по реакции:



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



Заканчивается процесс кристаллизации $\Pi_{\text{МК}}$ по реакции:



Из реакций (13) – (15) следует, что структура БЭЧ будет определяться концентрацией $\Pi_{\text{цк}}$. Чем она выше, тем более дисперсной становится структура отливок при их кристаллизации. При невысоком перегреве и (или) малом времени выдержки расплава БЭЧ $\Pi_{\text{МК}}$ распадаются в соответствии с реакцией, обратной (15).

При увеличении перегрева и (или) времени выдержки расплава БЭЧ в нем повышается концентрация атомов кислорода [7]. Они адсорбируются $\Pi_{\text{цк}}$ до определенной, критической концентрации. При ее превышении происходит распад $\Pi_{\text{цк}}$ по эффекту Ребиндера в соответствии со следующей реакцией:



Аналогичным образом распадаются $\Pi_{\text{сн}}$, но при более высоком перегреве и (или) большем времени выдержки расплава БЭЧ.

Таким образом, структурная наследственность при литье эвтектических чугунов определяется устойчивостью центров кристаллизации микрокристаллов аустенита, графита, цементита, которая зависит от концентрации адсорбированных атомов кислорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никитин, В. И.** Наследственность в литых сплавах / В. И. Никитин, К. В. Никитин. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 476 с.
2. **Курганов, В. А.** Наследственность и новые технологии получения конструкционных чугунов / В. А. Курганов // Наследственность в литейных процессах: труды VII Междунар. науч.-техн. симпозиума. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – С. 64–68.
3. **Марукович, Е. И.** Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск: Беларуская навука, 2009. – 192 с.
4. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 13–19.
5. **Марукович, Е. И.** Наноструктурная теория металлических расплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 7–9.
6. **Марукович, Е. И.** Пути решения проблемы структурной наследственности сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2019. – № 1. – С. 21–23.
7. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А. В. Курдюмов [и др.] М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 615 с.
8. Константы взаимодействия металлов с газами: справочник / Под ред. Б. А. Колачева и Ю. В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
9. Физико-химические свойства окислов: справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
10. Адсорбция водорода в микропористых углеродных адсорбентах различного генезиса / А. А. Фомкин [и др.] // Физикохимия поверхности и защиты материалов. – 2019. – Т. 55. – № 3. – С. 227–233.
11. **Вейлас, С.** Химическая кинетика и расчеты промышленных реакторов / С. Вейлас. – М.: Химия, 1964. – 432 с.

REFERENCES

1. **Nikitin V. I., Nikitin K. V.** *Nasledstvennost' v lityh splavah* [Hereditry in cast alloys]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005, 476 p.
2. **Kurganov V. A.** *Nasledstvennost' i novye tekhnologii polucheniya konstrukcionnyh* [Hereditry and new technologies for production of structural cast iron]. *Nasledstvennost' v litynyh processah: trudy VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. simpoziuma = Hereditry in foundry processes: works of VII Interunar. scientific-technical symposium*, Samara, Samar. gos. tekhn. un-t, 2008, pp. 64–68.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** *Modificirovanie splavov* [Modification of alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009, 192 p.
4. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V.** *Nanostrukturnaya kristallizaciya litynyh splavov* [Nanostructured crystallization of foundry alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
5. **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.
6. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** *Puti resheniya problemy strukturnoj nasledstvennosti splavov* [Ways to solve the problem of structural heredity of alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 1, pp. 21–23.
7. **Kurdyumov A. V.** *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov: uchebnik* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Izd. Dom MISiS Publ., 2011, 615 p.
8. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami: spravochnik* [Metal-Gas Interaction Constants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 368 p.
9. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov: spravochnik* [Physicochemical properties of oxides]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
10. **Fomkin A. A.** *Adsorbciya vodoroda v mikroporistykh uglerodnykh adsorbentah razlichnogo genезisa* [Hydrogen adsorption in microporous carbon adsorbents of different genesis]. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchity materialov = Physicochemistry of surface and protection of materials*, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 227–233.
11. **Vejlas S.** *Himicheskaya kinetika i raschety promyshchlennyh reaktorov* [Chemical kinetics and calculations of industrial reactors]. Moscow, Himiya Publ., 1964, 432 p.