



УДК 621.745.35

СТРУКТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ПЕРЕПЛАВКЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

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.

Разработан наноструктурный механизм структурной устойчивости при переплавке углеродистых сталей. Этот механизм определяется устойчивостью центров кристаллизации микрокристаллов δ-фазы и аустенита. Показано, что устойчивость зависит от концентрации адсорбированных атомов кислорода: чем она выше, тем менее устойчивы центры кристаллизации микрокристаллов δ-фазы и аустенита в расплавах углеродистых сталей, и наоборот. При увеличении перегрева и (или) времени выдержки расплавов в них повышается концентрация адсорбированных атомов кислорода. В результате снижается структурная устойчивость при переплавке углеродистых сталей.

Ключевые слова. Углеродистые стали, структурная устойчивость, переплавка, расплав, нанокристаллы, центры кристаллизации, адсорбция.

STRUCTURAL STABILITY DURING REMELTING OF CARBON STEELS

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 structural stability during remelting of carbon steels has been developed. This mechanism is determined by the stability of the crystallization centers of δ-phase microcrystals and austenite. It is shown that this stability depends on the concentration of adsorbed oxygen atoms. The higher this concentration, the less stable the crystallization centers of δ-phase microcrystals and austenite in carbon steel melts, and vice versa. With an increase in overheating and (or) holding time of carbon steel melts, the concentration of adsorbed oxygen atoms in them increases. As a result, structural stability decreases during the remelting of carbon steels.

Keywords. Carbon steels, structural stability, remelting, mel, nanocrystals, crystallization center, adsorption.

При небольших перегревах и (или) малом времени выдержки расплавов углеродистых сталей наблюдается эффект структурной наследственности между получаемыми и переплавляемыми отливками [1]. Эффективность структурной наследственности при литье сплавов определяется концентрацией центров кристаллизации, которые сохраняют стабильность при температурах выше температур ликвидуса [2, 3]. Эта стабильность и определяет структурную устойчивость при переплавке углеродистых сталей.

Цель работы – определить механизм структурной устойчивости при переплавке углеродистых сталей.

При содержании углерода до 0,5% углеродистая сталь кристаллизуется с образованием микрокристаллов δ-фазы ($\delta_{\text{МК}}$) [4]. Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, при плавлении, больших перегреве и времени выдержки расплава углеродистой стали $\delta_{\text{МК}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы железа ($\text{Fe}_{\text{ЭН1}}$) и графита ($\Gamma_{\text{ЭН1}}$), свободные атомы железа ($\text{Fe}_{\text{а1}}$) и углерода ($\text{C}_{\text{а1}}$) [5].

Процесс кристаллизации $\delta_{\text{МК}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [6]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($\delta_{\text{СН}}$) по реакции:



Затем образуются центры кристаллизации ($\delta_{\text{ЦК}}$):



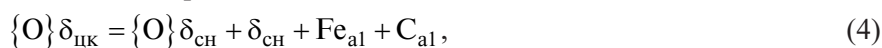
Заканчивается процесс кристаллизации $\delta_{\text{МК}}$ реакцией:



Из реакций (1)–(3) следует, что структура углеродистой стали, содержащей до 0,5% углерода, определяется концентрацией $\delta_{\text{цк}}$. Чем она выше, тем более дисперсной становится структура отливок при их кристаллизации. При небольшом перегреве и (или) малом времени выдержки расплава такой углеродистой стали $\delta_{\text{мк}}$ распадаются в соответствии с реакцией, обратной (3).

Кислород и водород растворяются в жидком железе в атомарном виде [7]. Атомы кислорода и водорода образуются при взаимодействии расплавов углеродистых сталей 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 расплавах углеродистых сталей преимущественно адсорбируются атомы кислорода. При этом они устойчивы в расплавах, так как стандартная теплота образования оксида FeO меньше стандартной теплоты адсорбции атомов кислорода на железе [8, 9].

При повышении перегрева и (или) увеличении времени выдержки расплава углеродистой стали, содержащей до 0,5% углерода, в нем возрастает концентрация атомов кислорода [7]. Атомарный кислород адсорбируется $\delta_{\text{цк}}$ до определенной критической концентрации. При ее превышении происходит распад $\delta_{\text{цк}}$ по эффекту Ребиндера в соответствии с реакцией:



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

При содержании углерода от 0,5 до 9,0% углеродистая сталь кристаллизуется с образованием микрокристаллов аустенита ($A_{\text{мк}}$) [4]. Согласно наноструктурной теории металлических расплавов, при плавлении, больших перегреве и времени выдержки расплава углеродистой стали $A_{\text{мк}}$ распадаются на элементарные нанокристаллы железа ($\text{Fe}_{\text{эн2}}$) и графита ($\Gamma_{\text{эн2}}$), свободные атомы железа (Fe_{a2}) и углерода (C_{a2}) [5].

Процесс кристаллизации $A_{\text{мк}}$ является наноструктурным и происходит следующим образом [6]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы ($A_{\text{сн}}$) по реакции:



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

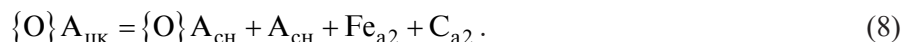


Заканчивается процесс кристаллизации $A_{\text{мк}}$ реакцией:



Из реакций (5)–(7) следует, что структура углеродистой стали, содержащей от 0,5 до 9,0% углерода, определяется концентрацией $A_{\text{цк}}$. Чем она выше, тем более дисперсной становится структура отливок при их кристаллизации. При небольшом перегреве и (или) малом времени выдержки расплава такой углеродистой стали $A_{\text{мк}}$ распадаются в соответствии с реакцией, обратной (7).

При повышении перегрева и (или) увеличении времени выдержки расплава углеродистой стали, содержащей от 0,5 до 9,0% углерода, в нем возрастает концентрация атомов кислорода [7]. Атомарный кислород адсорбируется $A_{\text{цк}}$ до определенной критической концентрации. При ее превышении происходит распад $A_{\text{цк}}$ по эффекту Ребиндера:



Таким образом, структурная устойчивость при переплавке углеродистых сталей определяется устойчивостью центров кристаллизации микрокристаллов δ -фазы и аустенита, которая обратно пропорциональна 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. Марукович, Е. И. Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск: Беларуская навука, 2009. – 192 с.
3. Марукович, Е. И. Пути решения проблемы структурной наследственности сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // Литейное производство. – 2019. – № 1. – С. 21–23.
4. Диаграмма состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справочник / под ред. О. А. Банных и М. Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1986. – 440 с.
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. Наноструктурная кристаллизация литейных сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко, А. В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 13–19.

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.: Metallurgia, 1987.– 368 с.
9. Физико-химические свойства окислов: справочник / под ред. Г. В. Самсонова.– М.: Metallurgia, 1978.– 472 с.

REFERENCES

1. **Nikitin V. I., Nikitin K. V.** *Nasledstvennost' v lityh splavah* [Heredity in cast alloys]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005.
2. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** *Modificirovanie splavov* [Modification of alloys]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009, 192 p.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** Puti resheniya problemy strukturnoy nasledstvennosti splavov. [Ways to solve the problem of structural heredity of alloys]. *Liteynoe proizvodstvo = Foundry production*, 2019, no. 1, pp. 21–23.
4. *Diagramma sostoyaniya dvoynyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza: spravochnik* [State diagram of binary and multicomponent systems based on iron: reference book]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986, 440 p.
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., Stetsenko A. V.** Nanostrukturnaya kristallizaciya litejnyh splavov [Nanostructured crystallization of casting alloys]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 13–19.
7. **Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V., Chursin V. M., Gerasimov S. P., Moiseev V. S.** *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys: textbook]. Moscow, MISiS Publ., 2011, 615 p.
8. *Konstanty vzaimodejstviya metallov s gazami: spravochnik* [Constants of interaction of metals with gases: reference book]. Moscow, Metallurgy Publ., 1987, 368 p.
9. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov: spravochnik* [Physico-chemical properties of oxides: reference book]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978, 472 p.