

УДК 536.7, 538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-B-C

ПИЛЯЕВА С.Б.¹, *с.н.с.*ФИЛОНЕНКО И.Ю.^{2*}, *к. ф.-м. н.*БАСКЕВИЧ А.С.³, *к. ф.-м. н., с. н. с.*¹ Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, г. Днепропетровск, пр. Гагарина, д. 72, Украина^{2*} Днепропетровская медицинская академия, г. Днепропетровск, пл. Октябрьская, д. 4, Украина, natph@mail.ru³ ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 8, Украина

Аннотация. *Целью данной работы* являлось исследование особенностей кристаллизации сплавов концентрационного треугольника Fe-Fe₂B-Fe₃C системы Fe-B-C. **Методика** Исследования проводили на сплавах с содержанием бора от 1,8...3% и углерода 2...2,5% (мас.), остальное железо. Для определения химического состава сплава использовали химический и микрорентгеноспектральный анализы. Фазовый состав сплавов определяли микроструктурным, рентгеноструктурными анализами. Температуру фазовых превращений в сплавах определяли дифференциальным термическим анализом. **Результаты.** Структура сплавов с содержанием бора 2,4% (мас.) и углерода 2,1% (мас.) после плавления и кристаллизации состояла из первичных кристаллов аустенита и эвтектики γ -Fe+Fe₃(CB) с пластинчатой морфологией. В результате последующего повторного нагрева, плавления и кристаллизации структура сплава состояла из распавшихся дендритов аустенита, а также присутствовали две различные по строению эвтектики: пластинчатая эвтектика γ -Fe+Fe₃(CB) и стержневая – γ -Fe+Fe₂₃(CB)₆. В структуре сплава системы Fe-B-C с содержанием бора 2,95 % (мас.) и углерода 2,3 % (мас.) присутствовали первичные дендриты фазы Fe₃(CB) и пластинчатая эвтектика γ -Fe+Fe₃(CB). Сплав после выплавки был предварительно отожжен при температуре 1170К в течение часа. После этого был нагрет до температуры на 30К выше ликвидуса и охлажден со скоростью 40К/мин. Микроструктура сплава состояла из первичных боридов Fe₂B, расположенных внутри крупных ограненных кристаллов фазы Fe₂₃(CB)₆ и мелкодисперсной эвтектики γ -Fe+Fe₂₃(CB)₆ со стержневой морфологией. **Научная новизна.** В сплавах с содержанием бора от 1,8...3% и углерода 2...2,5% (мас.), после плавления и кристаллизации происходит образование первичных кристаллов аустенита и эвтектики γ -Fe+Fe₃(CB) с пластинчатой морфологией. Последующее переплавляе и кристаллизация этих сплавов приводит к образованию аустенита и эвтектики γ -Fe+Fe₂₃(CB)₆. **Практическая значимость.** Полученные в данной работе результаты позволяют прогнозировать и влиять на фазовый состав и фазовые превращения в сплавах системы Fe-B-C.

Ключевые слова: сплавы системы Fe-B-C, эвтектика, аустенит, кубический борокарбид Fe₂₃(CB)₆, бороцементит Fe₃(CB), борид Fe₂B

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Fe-B-C

ПИЛЯЄВА С.Б.¹, *с.н.с.*ФІЛОНЕНКО І.Ю.^{2*}, *к. ф.-м. н.*БАСКЕВИЧ О.С.³, *к. ф.-м. н., с. н. с.*¹ Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара, м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 72, Україна^{2*} Дніпропетровська медична академія, м. Дніпропетровськ, пл. Жовтнева, 4, Україна, natph@mail.ru³ ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 8, Україна

Аннотація. *Метою даної роботи* є дослідження особливостей кристалізації сплавів концентраційного трикутника Fe-Fe₂B-Fe₃C системи Fe-B-C. **Методика** Дослідження провели на сплавах з вмістом бору 1,8...3% та карбону 2...2,5% (мас.), інше залізо. Для визначення хімічного складу сплаву використали хімічний та микрорентгеноспектральний аналізи. Фазовий склад сплавів визначали микроструктурним, рентгеноструктурним аналізами. Температуру фазових перетворень визначали диференціальним термічним аналізом. **Результати.** Структура сплавів з вмістом бору 2,4% та карбону 2,1% (мас.) після плавлення та кристалізації мала наступний склад: первинні кристали аустеніту та евтектика γ -Fe+Fe₃(CB) з пластинчатою морфологією. Послідуючий повторний нагрів, плавлення та кристалізація призводить до зміни фазового складу сплаву, а саме структура сплаву складалась з дендритів аустеніту та двох евтектик пластинчатої γ -Fe+Fe₃(CB) та стержневої – γ -Fe+Fe₂₃(CB)₆. У сплавів з вмістом бору 2,95% та карбону 2,3% (мас.) були присутні первинні дендрити фази Fe₃(CB) та пластинчата евтектика γ -Fe+Fe₃(CB). Сплав після плавлення мав попередній відпад при температурі 1170К на протязі години. Після чого був нагрітий до температури на 30К вище лінії ліквідусу та охолоджений зі швидкістю 40К/хв. Микроструктура сплаву мала наступний склад: первинні бориди Fe₂B,

розташовані в кристалах фази $Fe_{23}(CB)_6$ та дрібнодисперсна евтектика $\gamma-Fe+Fe_{23}(CB)_6$. *Наукова новизна.* У сплавах з вмістом бору 1,8...3% та карбону 2...2,5% (мас.) після плавлення та кристалізації відбувається утворення первинних кристалів аустеніту та евтектики $\gamma-Fe+Fe_3(CB)$ з пластинчатою морфологією. Послідуючі переплави та кристалізація цих сплавів призводить до утворення евтектики $\gamma-Fe+Fe_{23}(CB)_6$ та аустеніту. *Практична значимість.* Отримані в даній роботі результати дозволяють прогнозувати та впливати на фазовий склад та фазові перетворення у сплавах системи Fe-B-C.

Ключеві слова: сплави системи Fe-B-C, евтектика, аустеніт, кубичний борокарбид $Fe_{23}(CB)_6$, бороцементит $Fe_3(CB)$, борид Fe_2B

INVESTIGATION OF CRYSTALLIZATION PROCESSES Fe-B-C ALLOYS

PILYAEVA S.B.¹, Senior Scientist

FILONENKO I.Yu.², Ph. D.

BASKEVICH A.S.³ Ph. D., Senior Scientist

¹ Dnipropetrovsk National University, Oles Gonchar, Dnepropetrovsk, Gagarin ave., D. 72, Ukraine

^{2*} Dnipropetrovsk Medical Academy, Dnepropetrovsk, pl. October, d. 4, Ukraine, natph@mail.ru

³ SHEI "Ukrainian State University of Chemical Technology", Dnepropetrovsk, Gagarin ave., 8, Ukraine

Abstract. *Objective of the paper* is study of crystallization peculiarities of Fe-B-C system alloys for composition triangle Fe- Fe_2B - Fe_3C . *Methods.* The investigation was performed for alloy with boron content from 1,8...3% and carbon content of 2...2,5% (wt.), the rest is iron. To ascertain the chemical composition of alloy chemical analysis and X-ray microanalysis was used. Phase composition of alloy was revealed by means of microstructure and X-ray structure analysis. The temperature of phase transformations in alloys was determined by means of thermal analysis. *Results.* Structure of alloys with boron content of 2,4% (wt.) and carbon content of 2,1% (wt.) after melting and crystallization consists of primary austenite crystals and eutectic $\gamma-Fe+Fe_3(CB)$ with sheet-like morphology. As a result of next reheating, melting and crystallization the structure of alloy consists of decomposed austenite dendrites and two different in structure eutectics: sheet-like eutectic $\gamma-Fe+Fe_3(CB)$ and core eutectic $\gamma-Fe+Fe_{23}(CB)_6$. Structure of Fe-B-C system alloy with boron content of 2,95 % (wt.) and carbon content of 2,3 % (wt.) consists of primary bright dendrites of $Fe_3(CB)$ phase and sheet-like eutectic $\gamma-Fe+Fe_3(CB)$. After smelting alloy was preannealed at the temperature of 1170 K for hour. After this alloy was heated up to temperature 30 K above the liquidus and then was cooled with rate of 40 K/min. Microstructure of alloy consists primary borides Fe_2B , located inside large edged crystals of $Fe_{23}(CB)_6$ phase and finely-divided eutectic $\gamma-Fe+Fe_{23}(CB)_6$ with core morphology. *Scientific novelty.* In alloys with boron content from 1,8...3% and carbon content of 2...2,5% (wt.) after melting and crystallization the formation of primary austenite crystals and eutectic $\gamma-Fe+Fe_3(CB)$ with sheet-like morphology takes place. The next remelting and crystallization or holding for hour at the temperature 30 K above the liquidus of these alloys leads to formation of austenite and eutectic $\gamma-Fe+Fe_{23}(CB)_6$. *Practical implications.* The results of the investigation enable to project and effect on the phase composition and phase transformations in alloys of Fe-B-C system.

Keywords: Fe-B-C system alloys, eutectic, austenite, borotsementyt $Fe_3(CB)$, cubic борокарбид $Fe_{23}(CB)_6$, boride Fe_2B

1. Постановка проблемы

При содержании бора до 0,08% (мас.) в сплавах наблюдали образование многофазных включений, в которых фаза $Fe_{23}(CB)_6$ была структурной составляющей [4, 5, 7]. В литературе приведены данные по исследованию электронной структуры фазы $Cr_{23}C_6$ [15], значений ее термодинамических функций [16], влиянию механической обработки на устойчивость фазы [1]. Кроме этого, в работе [3] на основании квантово-механических расчетов показано, что в бористых сплавах возможно образование борокарбидных фаз на основе железа. Показано, что кубический борокарбид $Fe_{23}(CB)_6$ может являться структурной составляющей многофазных включений [2]. Авторы работы исследовали термодинамические функции

кубического борокарбида $Fe_{23}(CB)_6$, и показали, что он термодинамически устойчив в интервале температур 973...1173K [10]. Кроме этого, на основании результатов расчета методом Хиллберга-Стеффонсона энергии Гиббса фазы $Fe_{23}(CB)_6$ построены изотермические сечения диаграммы состояния Fe-B-C для сплавов с малым содержанием бора и показано место данной фазы на ней [11]. Существующие сведения о фазовых превращениях в концентрационном треугольнике Fe- Fe_2B - Fe_3C системы Fe-B-C сплавов при кристаллизации из жидкого состояния, свидетельствуют о том, что равновесными фазами являются: твердый раствор железа, борид Fe_2B и бороцементит $Fe_3(CB)$. Соединение $Fe_{23}(CB)_6$ изоморфное карбиду $Cr_{23}C_6$ впервые описано в работе [12], как конгруэнтно

плавящаяся фаза. По данным работы [6] фаза $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ существует в твердом состоянии и не устойчива при температурах выше 1230К. В работе [6] была показана возможность выделения этого соединения при высоких переохлаждениях. В работе [8] было установлено, что выделения кубического боркарбида $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ при кристаллизации из жидкого состояния происходит после специальной предшествующей обработки, которая включала термоциклирование в твердо-жидком состоянии не менее 5-6 циклов в интервале температур 1123-1613 К. Однако не выявлен механизм образования кубического борокарбида $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ в сплавах Fe-B-C.

2. Цель работы

Целью данной работы являлось исследование особенностей кристаллизации сплавов системы Fe-B-C для концентрационного треугольника Fe-Fe₂B-Fe₃C.

3. Материалы и методика исследований

Исследования провели на сплавах с массовой долей бора от 1,8...3% и углерода 2...2,5% (мас.), остальное железо. Для получения сплавов Fe-B-C использовали: железо карбонильных (с содержанием железа 99,95% (мас.)), аморфный бор (с содержанием бора 97,5,0% (мас.)) и спектральночистый графит. Выплавку образцов проводили в печи Тамана с в атмосфере аргона. Скорость охлаждения исходных образцов сплавов составляла 50 К/с. Для определения химического состава сплава использовали химический и спектральный анализ [9]. Фазовый состав сплавов определяли по методу микрорентгеноспектрального анализа на микроскопе JSM-6490 и с помощью оптического микроскопа «Неофот-21». Рентгенофазовый анализ осуществляли на дифрактометре ДРОН-3 в монохроматическом Fe-K α . Типы и температуры фазовых превращений определяли методом дифференциального термического анализа с применением «диревитограф». Также использовали дифференциальный термический анализ с применением потенциометра Н307/1 и КСП-4 на образцах цилиндрической формы. Точность измерения составила ± 5 С. Изучение процесса затвердевания изучали на железоуглеродистых образцах часть из которых была предварительно подвергнута отжигу при температурах 1123-1173 К перегрев при плавлении образцов сплавов не превышал 30 К выше линии ликвидуса. Скорость нагрева и охлаждения составила 30-40 К/мин.

4. Результаты и их обсуждение

Структура сплавов с содержанием бора 2,4% (мас.) и углерода 2,1% (мас.) после плавления и кристаллизации состояла из первичных кристаллов аустенита и эвтектики $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_3(\text{CB})_6$ с пластинчатой морфологией (рис. 1).

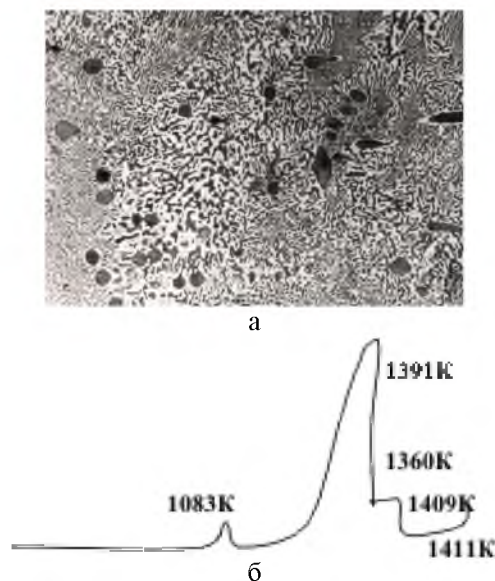


Рис. 1 (а) микроструктура сплава $\times 400$, (б) дифференциальная термограмма / Fig. 1 (a) microstructure of Fe-B-C $\times 400$, (b) differential thermogram

Рентгеноструктурный анализ показал присутствие $\gamma\text{-Fe}$, $\text{Fe}_3(\text{CB})_6$ и также кубического борокарбида $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$. Ее присутствие фиксировали в виде отдельных включений в первичных дендритах распавшегося аустенита. Часть образцов с содержанием бора 2,4% (мас.) и углерода 2,1% (мас.) подвергли повторному нагреву, плавлению и кристаллизации.

В результате этого сформировалась структура, в которой помимо распавшихся дендритов аустенита присутствовали две различные по строению эвтектики: с пластинчатой эвтектикой $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_3(\text{CB})_6$ и стержневой – $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$.

Рентгеноструктурный анализ этих сплавов показал следующий фазовый состав: $\gamma\text{-Fe}$, $\text{Fe}_3(\text{CB})_6$ и кубический борокарбид $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$. Термограмма этого сплава представлена на рис. 2.

Выделения первичных кристаллов происходит при 1411К. При температуре 1391°C на термограмме наблюдали тепловой эффект, который свидетельствует о формировании эвтектики $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$. При повышении температуры до 1401°C на термограмме присутствовал тепловой эффект, соответствующий эвтектическому превращению $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_3(\text{CB})_6$.

Исследование структуры после третьего переплава показало, что в структуре наблюдали первичные дендриты распавшегося аустенита и эвтектику $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$. Рентгеноструктурный анализ показал присутствие в сплаве фаз $\gamma\text{-Fe}$ и $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$. На термограмме сплава наблюдали тепловой эффект соответствующий выделению первичных дендритов при температуре 1423°C, охлаждению до температуры 1360°C, подъему до температуры 1391°C и наличие площадки при этой температуре, которая соответствует кристаллизации эвтектики $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$.

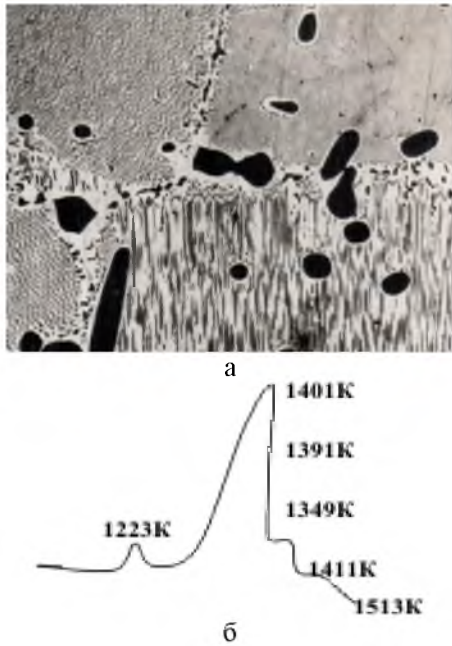


Рис. 2 (а) микроструктура сплава после третьего переплава $\times 400$, (б) дифференциальная термограмма / Fig. 2 (a) microstructure of Fe-B-C after three smelting $\times 400$, (б) differential thermogram

Анализ полученных результатов показал, что для сплавов с содержанием бора 2,4% (мас.) и углерода 2,1% (мас.) после плавления и кристаллизации кубический борокарбид являлся структурной составляющей.

Каждый последующий нагрев, плавление и кристаллизация сплавов приведенного состава приводит к формированию эвтектики $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ и увеличению ее объемной доли.

Структура сплава системы Fe-B-C с содержанием бора 2,95 % (мас.) и углерода 2,3 % (мас.) состояла из первичных светлых дендритов фазы $\text{Fe}_3(\text{CB})$ и пластинчатой эвтектики $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_3(\text{CB})$ (рис. 3, а).

По результатам рентгеноструктурного анализа на диффрактограммах сплава присутствуют линии кубического борокарбида $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$, однако при исследовании микроструктуры данная фаза не выявлена (рис. 3, б).

Сплав после выплавки был предварительно отожжен при температуре 1170 К в течение часа, и после этого был нагрет до температуры на 30К выше ликвидуса и охлажден со скоростью 40К/мин. Рентгеноструктурный анализ этого сплава показал на диффрактограммах присутствие линий характерных для борида Fe_2B , борокарбида $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ и α -раствора железа. Микроструктура сплава состояла из первичных боридов Fe_2B , расположенных внутри крупных ограниченных кристаллов фазы $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ и мелкодисперсной эвтектики $\gamma\text{-Fe}+\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$, имеющей стержневую морфологию. Выделения первичных боридов происходят в интервале температур 1403-1358К.

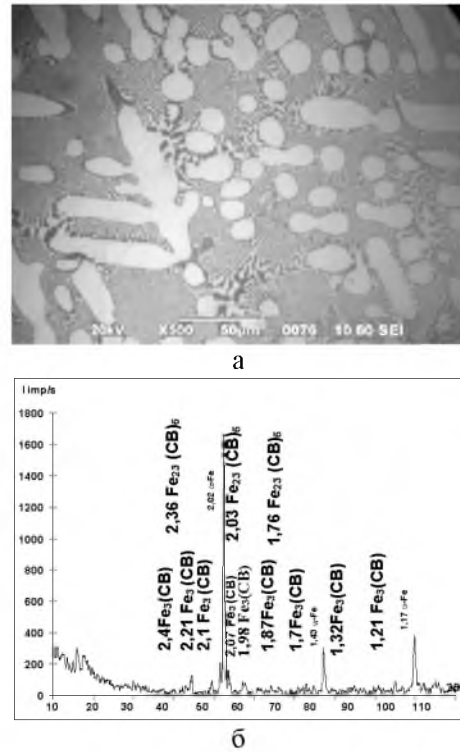


Рис. 3 (а) микроструктура сплава кристаллизации $\times 400$, (б) диффрактограмма / Fig. 3 (a) microstructure of Fe-B-C after smelting $\times 400$, (б) diffractogram

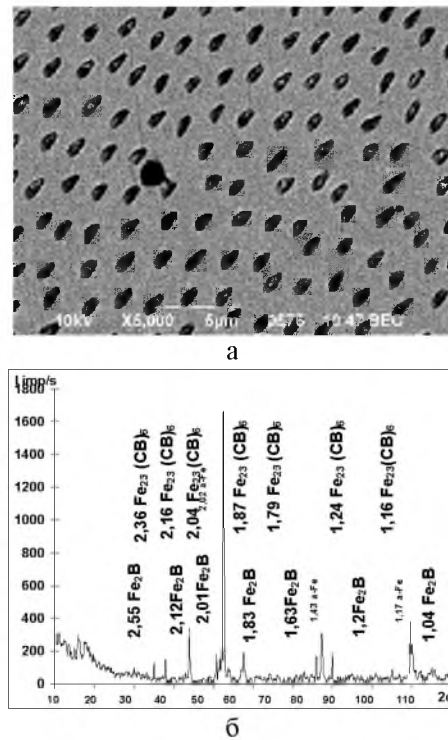


Рис. 4 (а) эвтектика $\gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$, (б) диффрактограмма / Fig. 4 (a) eutectics $\gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$, (б) diffractogram

В интервале температур 1358-1389 К начинается перитектическое растворение борида Fe_2B и формирование борокарбида $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$. При

температуре 1389 К происходит четырехфазное превращение $L+Fe_2B \rightarrow Fe_{23}(CB)_6+\gamma-Fe$. В результате перитектического растворения фазы Fe_2B формируется эвтектическая составляющая $Fe_{23}(CB)_6+\gamma-Fe$ с тонкой дифференцировкой (рис. 4, а). Подтверждением этому может служить наличие выделений кристаллов фазы Fe_2B не только внутри кристаллов фазы $Fe_{23}(CB)_6$, но и в окружении эвтектики $Fe_{23}(CB)_6+\gamma-Fe$ (рис. 4, б).

Образование структур, в состав которых входят выделения фазы $Fe_{23}(CB)_6$ связано с предшествующим их образованием в твердом состоянии при проведении предварительного отжига. Согласно данным работы [9] образование фазы $Fe_{23}(CB)_6$ во время отжига описывается реакцией $\gamma-Fe+Fe_3(CB) \rightarrow Fe_{23}(CB)_6$ и происходит на межфазных границах эвтектики $\gamma-Fe+Fe_3(CB)$.

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что последующий нагрев до температуры плавления и непродолжительная выдержка при температуре на 30 К выше ликвидуса сопровождается образованием в расплаве сложных комплексов по составу близких к составу фазы $Fe_{23}(CB)_6$. При этом происходит обогащение других областей расплава атомами бора, последующее

охлаждение приводит к выделению первичных кристаллов борида Fe_2B и фазы $Fe_{23}(CB)_6$, как продукта перитектической реакции $L+Fe_2B \rightarrow Fe_{23}(CB)_6$

Выводы:

Для сплавов с содержанием бора 2,4% (мас.) и углерода 2,1% (мас.) после плавления и кристаллизации кубический борокарбид $Fe_{23}(CB)_6$ являлся структурной составляющей.

В сплавах Fe-B-C с содержанием бора 2,95 % (мас.) и углерода 2,3 % (мас.), структурными составляющими, которого являются первичные дендриты фазы $Fe_3(CB)$ и пластинчатая эвтектика $\gamma-Fe+Fe_3(CB)$, образование кубического борокарбида $Fe_{23}(CB)_6$ из жидкого состояния в этих сплавах возможно после предварительного нагрева до температуры 1170К.

Образование фазы $Fe_{23}(CB)_6$ происходит при перитектическом растворении борида Fe_2B , а формирование эвтектики $Fe_{23}(CB)_6+\gamma-Fe$ наблюдали в результате четырехфазного перитектического превращения $L+Fe_2B \rightarrow Fe_{23}(CB)_6+\gamma-Fe$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баринов В. А. Неустойчивость фазы $Fe_{23}B_6$ при механической обработке [Текст] / В. А. Баринов, В.А.Цурин, В.И.Воронин, В.Т. Сурик // Физика металлов и материаловедение. – 2009. – Т. 108, № 1. – С. 54–62.

Barinov V. A. The instability of the $Fe_{23}B_6$ phase during mechanical processing. / Jyrinov V. A., Voronin B. I., Syrik V. T. // – 2009. – т. 108, № 1. – р. 54–62.

2. Береза О.Ю. Вплив карбону на фазовий склад та фазові перетворення в сплавах системи Fe-B-C [Текст] / О.Ю. Береза., Н.Ю. Філоненко, С.Б. Піляєва // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Карабіна, серія «Фізика», – 2013. – Вип. 19. – №1076. – С. 60-65.

Beryoza O. Yu. Determined phase composition and mechanism of phase transformations in alloys of the Fe-B-C / Filonenko N. Yu., Pilyaeva S. B. // Visnik kharkivskij univercitet, serija "Fizika", v. 19. – 2013. – №1076. – р. 60-65.

3. Береза О. Ю. Розрахунок хімічного зв'язку фаз, що містять бор, у сплавах системи Fe-B-C [Текст] [Текст] / О. Ю. Береза, Н. Ю. Філоненко, О. С. Баскевич // Наукові вісті Національного технічного університету України КПІ. – 2012. – №4(84). – С. 116-121.

Beryoza Ye.Yu. Calculation of energy chemical communication phases containing boron in alloy Fe-B-C. / Filonenko N. Yu., Baskevich A.S. // Naukovi visti KPI. – 2012. – №4(84). – р. 116-121.

4. Кузьма Ю.Б., Чабан П.Ф. Двойные и тройные системы, содержащие бор. / Ю.Б. Кузьма, П.Ф. Чабан. Справочник. М.: Металлургия., 1990. – 320 с..

Yu. B. Kuzma, P. F. Chaban. Boron-bearing binary and ternary systems. Handbook. Moscow: Metallurgy, 1990. –320 p. (in Russian).

5. Лякишев Н. П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. *Боросодержащие стали и сплавы* / Н. П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо; М.: Металлургия, 1986. – 191 с..

N. P. Lyakishev, Yu. L. Pliner, S. I. Lappo. Boron-bearing steels and alloys. Moscow: Metallurgy, 1986. – 191 p. (in Russian).

6. Піляєва С.Б. Особенности образования соединения $Fe_{23}(CB)_6$ в сплавах Fe-B-C [Текст] / С.Б. Піляєва, О.Г. Безрукавая, В.Ф. Бутенко. // Весник днепропетровского университета. Физика, радиоэлектроника. – 1998. – Вып. 4. – С. 23-26..

\Pilyaeva S. B., Bezrukavaya O. G., Butenko V. F. Peculiarities of $Fe_{23}(CB)_6$ compound formation in Fe-B-C alloys // Visnyk Dnipropetrovskoho univertsytetu. Fyzyka. Radioelektronika, Issue 4. . – 1998. – т. 4. – Р. 23-26. (in Russian).

7. Самсонов Г. В. *Бориды..* / Г. В. Самсонов, Т. И. Серебрякова, В. А. Неронов; М.: Атомиздат, 1999. –220 с.

Samsonov G. V. Borides./ G. V. Samsonov, T. I. Serebryakova, V. A. Neronov. //Moscow: Atomizdat, 1999. – 220 p. (in Russian).

8. Спиридонова И.М. Піляєва С.Б. Особенности формирования структуры при кристаллизации сплавов системы Fe-B-C [Текст] / Спиридонова И.М. Піляєва С.Б. // Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур: Международная научная конф., 6-8 октября 2011 г.: Сб. науч. трудов. – Харьков, 2011. – С.404-407.

Spiridonova I. M. Pilyaeva S. B. S. B. Peculiarities of structure formation during solidification of alloys of the system Fe-B-C [Text] / I. M. Spiridonova, S. B. Pilyaeva // Physical and chemical principles of formation and modification of micro- and nanostructures: international scientific conference., October 6-8, 2011: Sat. scient. works. - Kharkov, 2011. - S. 404-407

9. С. В. Твердохлебова, И. М. Спиридонова, А. М. Бондаренко. Спектральный анализ борсодержащих сплавов [Текст] // Заводская лаборатория. 1990, №11, с. 46-49.
Tverdokhlebova S. B. Spectrographic analysis of boron-bearing alloys [Text] / S. B. Tverdokhlebova, I. M. Spiridonova, A. M. Bondarenko. // Zavodskaya laboratoriya. №11, 1990. – P. 46-49 (in Russian).
10. Філоненко Н. Ю. Дослідження термодинамічних функцій фаз, що містять бор, системи Fe-B-C [Текст] / Н. Ю. Філоненко // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, № 2. – С. 370-374.
Filonenko N. Yu. The study of the thermodynamic functions of phase containing boron system [Text]/ Filonenko N. Yu. // Physics and chemistry of solids body. - 2011. - v 12, No. 2. - P. 370-374.
11. Ohtani, H. Calculation of Fe-C-B Ternary Phase Diagram [Text] / H. Ohtani, M. Hasebe, T. Nishizawa // Transactions ISIJ. –1988. – Vol. 28. – P. 1043-1050.
12. Stadelmaier H.H., Draughn R.A., Hofer G. Die Struktur der ternären Boride vom Chromkarbid - C23C6-Typ [Text] / H.H.Stadelmaier, R.A. Draughn, G. Hofer // Metall. – 1963. – vol. 5. – P. 412-422.
13. Xie, J. Y. Atomistic study on the site preference and thermodynamic properties for Cr_{23-x}Fe_xC₆ [Text] / J. Y Xie., N. X Chen, L. D. Teng, and S. Seetharaman //Acta Materialia. – 2005. – 53. – P. 5305-5312.,
14. Santos, A. V. Comparative study between LMTO and FLAPW into the calculation of the electronic structure of carbide Cr₂₃C₆ [Text] / A. V. Santos // Physica B. – 2007. –387. – P. 136-142.

Рекомендації к публікації статті – д.т.н., професор Верещак В.Г., Україна; д.т.н., професор Соболев В.В., Україна
Поступила в редколлегию 21.01.2015
Принята к печати 24.03.2015