

Металловедение и термическая обработка Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья
УДК 669.14.018.017
DOI: 10.14529/met240102

ВЛИЯНИЕ БОРА И СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ СИСТЕМЫ Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti

О.С. Молочкова[✉], opetrochenko@mail.ru
Е.В. Петроченко, evp3738@mail.ru

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

Аннотация. Улучшить технологические и эксплуатационные свойства белых высокохромистых чугунов можно путем изменения соотношения основных химических элементов в отливках, комплексного легирования, микролегирования и модифицирования, условий кристаллизации металлов в отливках и методов термической обработки, что позволяет управлять процессом формирования структуры и свойств металла в отливках.

Стабильность структуры и жароизносостойкость зависят от типа и морфологии карбидов и соответствующей металлической основы, химического состава структурных составляющих, которые определяют защитные свойства оксидных слоев, так как авторами было показано, что окалиностойкость является структурно-чувствительным свойством. Изучение влияния бора и режимов охлаждения в литейной форме на распределение химических элементов в фазах чугунов системы Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti, обеспечивающих стабильность структуры и эксплуатационных свойств при рабочих температурах, является актуальной задачей.

Ключевые слова: модифицирование, жароизносостойкий чугун, фазовый состав, микроструктура, химический состав, первичные карбиды, металлическая основа

Для цитирования: Молочкова О.С., Петроченко Е.В. Влияние бора и скорости охлаждения при затвердевании на химический состав структурных составляющих комплексно-легированных белых чугунов системы Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 1. С. 15–22. DOI: 10.14529/met240102

Original article
DOI: 10.14529/met240102

INFLUENCE OF BORON AND COOLING RATE DURING SOLIDIFICATION ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF STRUCTURAL COMPONENTS OF COMPLEX-ALLOYED WHITE CAST IRONS OF THE Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti SYSTEM

O.S. Molochkova[✉], opetrochenko@mail.ru
E.V. Petrochenko, evp3738@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. It is possible to improve the technological and operational properties of white high-chromium cast irons by changing the ratio of basic chemical elements in castings, complex alloying, micro alloying and modification, conditions of crystallization of metals in castings and heat treatment methods, which makes it possible to control the process of formation of structure and properties of metal in castings.

Structure stability and heat and wear resistance depend on the type and morphology of carbides and the corresponding metal base, chemical composition of structural components that determine the protective properties of oxide layers, since the authors have shown that scale resistance is a structure-sensitive property. The study of the influence of boron and cooling modes in the casting mold on the distribution of chemical elements in the phases of cast irons of the Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti system, ensuring the stability of structure and operational properties at operating temperatures is an urgent task.

Keywords: modification, heat and wear resistant cast iron, phase composition, microstructure, chemical composition, primary carbides, metal basis

For citation: Molochkova O.S. Influence of calcium-strontium carbonate and cooling conditions during solidification on structure and properties of complex-alloyed white cast irons of Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti–Al–Nb system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2024;24(1):15–22. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240102

Введение

Регулировать тип и строение металлической основы чугунов, количество, тип и морфологию карбидной фазы в эвтектике, характер эвтектических композиций можно изменением скорости охлаждения (заливка в различные типы форм) и дополнительным их микролегированием и модифицированием малыми добавками высокоактивных элементов. Как известно, к поверхностно-активным элементам относят бор, особенностью которого является его воздействие на размер зерен и состояние межзеренных границ [1–5]. Бор используют как микролегирующую и модифицирующую добавку в износостойких чугунах [6]. Бор как поверхностно-активный элемент оказывает сильное влияние на процессы кристаллизации чугуна, улучшает состояние границ зерен, измельчает их и дополнительно раскисляет металл, что положительно влияет на процесс производства отливок и их эксплуатационные свойства. Бор также уменьшает размеры эвтектических колоний и устраняет транскристаллизацию в белых чугунах [7]. Улучшение технологических и эксплуатационных свойств чугуна после добавления бора снижает содержание хрома, марганца, никеля и других элементов.

Скорость охлаждения – наиболее существенный фактор, определяющий характеристики первичной литой структуры белых износостойких чугунов. Номенклатура отливок из износостойких высокохромистых чугунов по массе и толщине стенок достаточно широка. Соответственно широк и диапазон скоростей охлаждения реальных отливок в интервале кристаллизации. По данным [8, 9] он составляет 0,5–200 °C/мин. Вследствие этого могут существенно меняться структура и свойства одного и того же состава чугуна при изготовлении из него отливок различных configura-

ций, массы, толщины стенки. Знание характера изменения этих свойств позволяет управлять конечной литой структурой сплавов и прогнозировать их свойства.

Материалы и методика исследования

Исследования проводили на комплексно-легированных белых чугунах системы Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti. Экспериментальные плавки опытных чугунов осуществляли в индукционной тигельной печи с основной футеровкой. После выплавки опытных образцов проводили раскисление расплава в ковше и заливку его в сухие и сырые песчано-глинистые формы (ПГФ) и кокиль. Скорость охлаждения в интервале кристаллизации в сухой ПГФ составляет 3–10 град./мин, в сырой ПГФ – 8–12 град./мин, в чугунном кокиле – до 30 град./мин. Определение химического состава чугунов осуществляли на оптическом эмиссионном спектрометре SpectromaXx фирмы Spectro, Германия (НИИ Наносталей, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), а также на эмиссионном спектрометре фирмы «Бэрд» и на спектрометре OBLF QSG 750 по ГОСТ 18895–97. Структуру, фазовый состав чугунов и оксидных слоев исследовали с помощью металлографического и рентгенографического методов. Рентгеновская съемка производилась на дифрактометре ДРОН-УМ1, ДРОН-3 (в кобальтовом Ка излучении). Дифрактометр совмещен с РС. Обработка экспериментальных данных производилась по комплексу КО-ИМЕТ. Фазовый анализ осуществлялся с помощью программы XRAYAN и базы данных PDF.

Микрорентгеноспектральные исследования фазовых составляющих в сплавах и поверхности окисления проводили на растровых электронных микроскопах JEOL JSM-6460 LV, TESCAN VEGA II XMU, Camscan с микро-

рентгеноспектральными анализаторами. Распределение химических элементов по глубине оксидного слоя исследовали на спектрометре тлеющего разряда. Металлографические исследования микроструктуры сплавов проводили на оптических микроскопах «МЕТАМ-ЛВ31», Epiquant, МЕИИ-2700 при увеличении от 100 до 1000 крат и растровых электронных микроскопах Camscan и JEOL JSM-6460 LV при увеличении от 50 до 160 000 крат.

Химический состав модифицированных бором сплавов, был следующим, % масс.: 2,05–2,28 С; 18,35–18,8 Cr; 4,45–5,05 Mn; 0,87–1,2 Ni; 0,35–0,75 Ti; 0,005–0,03 В.

Результаты исследования

Изучено влияние добавок бора в количестве 0,005–0,03 % и температурных режимов охлаждения металла в литейной форме на фазовый состав сплавов и химический состав

структурных составляющих чугунов системы Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что после добавления бора в чугуны ИЧ220Х18Г4НТ фазовый состав металлической основы не изменился – γ -твердый раствор углерода и легирующих элементов в железе. Карбидная фаза представлена комплексными карбидами типа M_7C_3 и карбонитриды титана $Ti(C, N)$. Структура модифицированных чугунов – первичные карбиды титана, дендриты аустенита, эвтектика $A + (Fe, Cr, Mn)_7C_3$ и вторичные карбиды $(Fe, Cr, Mn)_7C_3$ (рис. 1). Кристаллизация сплава происходит в несколько этапов. В первую очередь образовались тугоплавкие карбиды TiC , затем дендриты твердого раствора (аустенита) и последующая завершающая эвтектическая реакция происходит с образованием аустенитохромистокарбидной эвтектики $A + (Fe, Cr, Mn)_7C_3$, далее

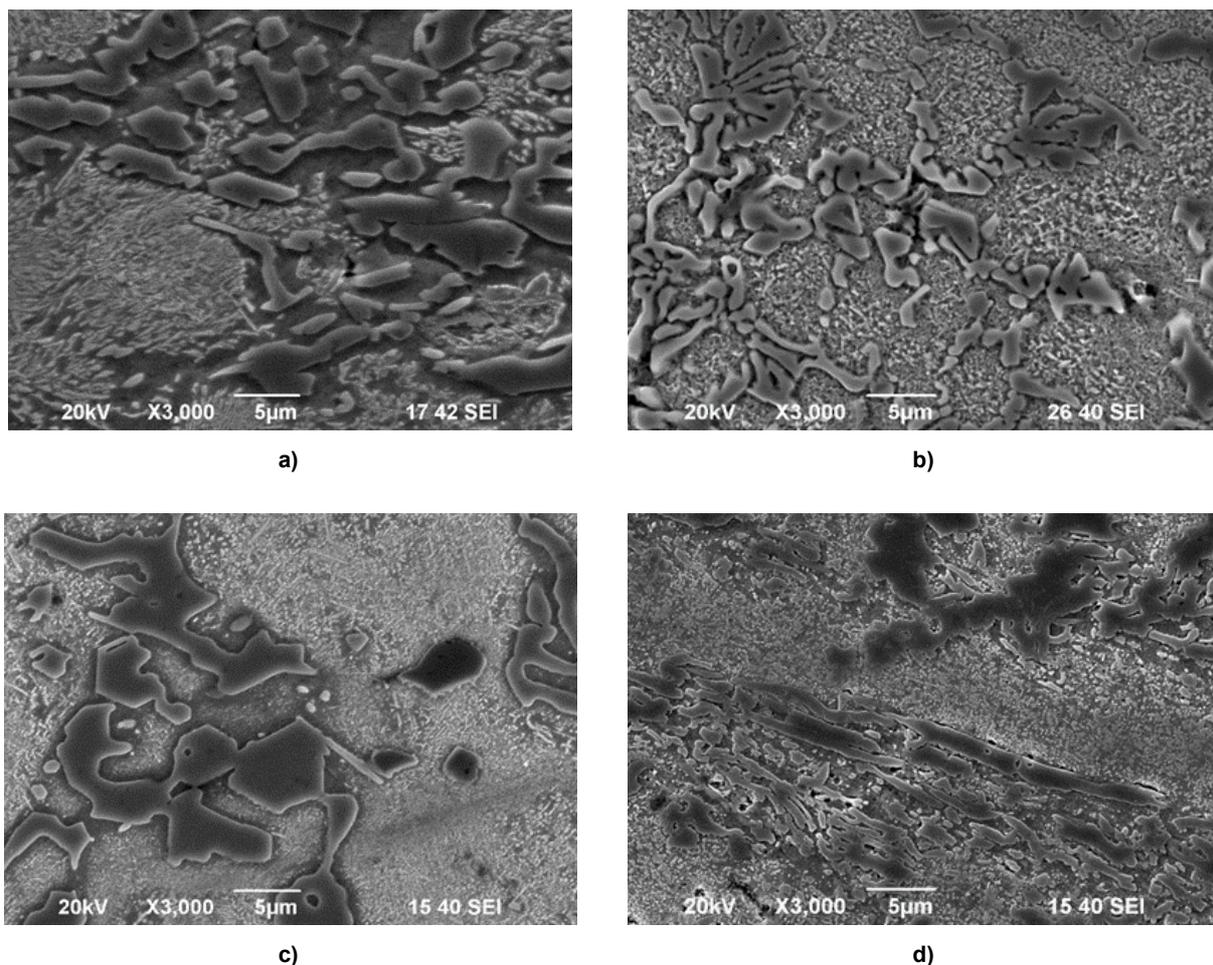


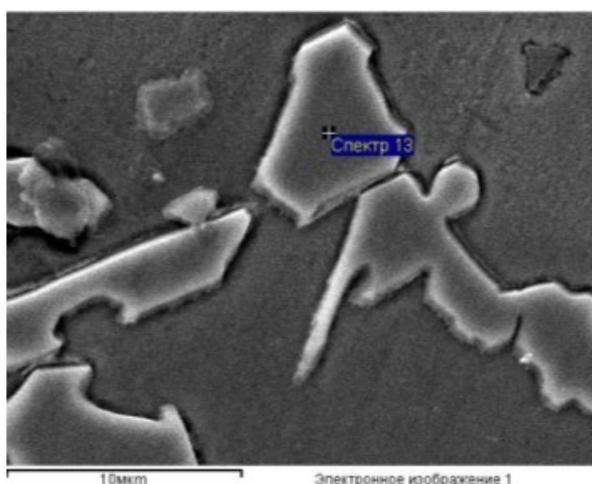
Рис. 1. Микроструктура модифицированных чугунов: а – 0,0054 % В, сухая ПГФ; б – 0,0058 % В, кокиль; с – 0,032 % В, сухая ПГФ; д – 0,036 % В, кокиль
 Fig. 1. Microstructure of modified cast irons: а – 0.0054 % B, cast in dry SLM; б – 0.0058 % B, cast in block mold; с – 0.032 % B, cast in dry SLM; д – 0.036 % B, cast in block mold

происходит вторичная кристаллизация при охлаждении в литейной форме с образованием вторичных карбидов (Fe, Cr, Mn)₇C₃.

Для условий высокотемпературного окисления наиболее подходящей является однофазная структура металлической основы чугунов. Фазовый состав основы зависит от химического состава сплава и термокинетических условий кристаллизации. Если металлическая основа многофазная, происходит образование в формирующихся оксидных пленках большого числа дефектов различной природы, что приводит к их растрескиванию, снижению их защитных функций в процессе эксплуатации и полному разрушению поверхности изделия.

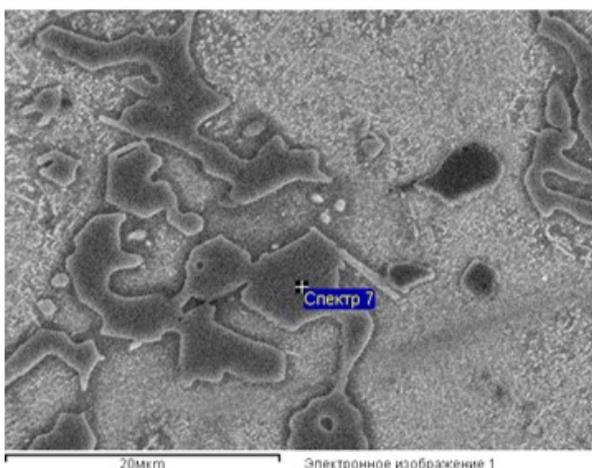
По результатам проведенных исследований установлено, что бор в основном находится в карбидной фазе (рис. 2, 3) и увеличивает ее количество в хромистых чугунах. Скорость охлаждения оказывает влияние на количество карбидной фазы в чугунах. Так, в периферийных слоях образцов из чугуна, легированного бором, прирост количества карбидной фазы более значителен, чем в центральных слоях образцов.

С помощью микрорентгеноспектрального количественного анализа (МРСКА) определили влияние добавок бора на изменение химического состава фаз для образцов, залитых в сухую ПГФ (табл. 1) и кокиль (табл. 2) отдельно, чтобы исключить влияние скорости



Элемент	Весовой %
B	8.03
Ti	0.46
Cr	36.93
Mn	2.61
Fe	20.83

Рис. 2. Фотография микроструктуры чугуна с 0,0054 % В, сухая ПГФ и химический состав карбидов типа M₇C₃
Fig. 2. Photograph of the microstructure of cast iron with 0.0054 % B, dry SLM and chemical composition of carbides of M₇C₃ type



Элемент	Весовой %
B	11.27
Ti	0.41
Cr	35.33
Mn	2.89
Fe	20.90

Рис. 3. Фотография микроструктуры чугуна с 0,032 % В, сухая ПГФ и химический состав карбидов типа M₇C₃
Fig. 3. Photograph of the microstructure of cast iron with 0.032 % B, dry SLM and chemical composition of carbides of M₇C₃ type

Химический состав структурных составляющих чугунов, залитых в сухую ПГФ

Таблица 1

Chemical composition of structural constituents of cast irons cast in dry SLM

Table 1

Химический элемент	Первичные карбиды				Эвтектические карбиды				Металлическая основа			
	№ образца*				№ образца				№ образца			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Содержание элементов**, %											
Cr	3,52	5,09	5,45	5,79	52,5	34,8	36,3	35,4	11,0	14,2	16,3	17,3
Mn	–	0,91	–	1,37	3,95	3,62	3,16	4,10	3,72	3,39	2,84	3,44
Fe	3,13	9,33	8,82	9,52	31,4	33,8	29,7	32,23	75,87	58,14	58,34	61,54
Ni	–	–	–	–	–	0,64	0,76	–	1,13	1,24	1,34	1,40
Ti	50,8	52,5	58,99	62,26	0,29	0,46	0,47	0,51	–	–	–	–
B	–	–	8,39	9,89	–	–	8,03	12,44	–	–	–	7,91

*Номера образцов: 1 – 0 % В; 2 – с 0,005 % В; 3 – с 0,01 % В; 4 – с 0,02 % В.

**Средние значения из 30 измерений.

Химический состав структурных составляющих чугунов, залитых в кокиль

Таблица 2

Chemical composition of structural constituents of cast irons cast in block mold

Table 2

Химический элемент	Первичные карбиды				Эвтектические карбиды				Металлическая основа			
	№ образца*				№ образца				№ образца			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Содержание элементов**, %											
Cr	9,69	11,73	15,61	6,81	41,61	33,69	35,1	33,60	14,50	14,82	14,93	15,98
Mn	–	1,8	2,57	1,20	5,12	2,71	3,04	3,82	4,51	2,74	3,13	3,22
Fe	13,3	24,46	33,92	17,33	39,51	38,18	35,4	36,06	74,05	63,17	51,18	65,31
Ni	–	–	–	–	–	–	–	–	0,93	2,04	1,58	1,52
Ti	48,8	33,89	20,2	42,03	0,81	0,94	–	0,76	–	–	–	–
B	–	–	–	12,29	–	–	–	14,32	–	–	–	–

*Номера образцов: 1 – 0 % В; 2 – с 0,005 % В; 3 – с 0,01 % В; 4 – с 0,02 % В.

**Средние значения из 30 измерений.

охлаждения на эти значения. Бор замедляет диффузию элементов в расплаве, способствует перераспределению легирующих элементов между отдельными структурными составляющими сплава и повышает степень переохлаждения на всех этапах кристаллизации. Для образования центров кристаллизации нужны более низкие температуры.

Для чугунов, залитых в сухую ПГФ, при добавке бора 0,01 %, он присутствует в первичных карбидах в количестве 8,39 %, в эвтектических карбидах – 8,03 %. При увеличении количества бора в сплаве до 0,02 % его содержание в первичных карбидах – 9,89 %, в эвтектических карбидах – 12,44 %, в металлической основе составляет 7,91 % (см. табл. 1). Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что собственных фаз бор не образует.

При увеличении содержания бора в сплаве повышается количество хрома в первичных карбидах типа МС (с 3,52 до 5,79 %), заметно снижается его содержание в эвтектических карбидах (с 52,5 до 34–35,4 %). Повышается его содержание в металлической основе в 1,5 раза (с 11 до 17,3 %), поэтому при охлаждении в твердом состоянии выделяются вторичные карбиды типа M_7C_3 , таким образом, происходит вторичное твердение в литейной форме. Степень легирования хромом металлической основы возрастает, что приводит к повышению ее электрохимического потенциала и способствует образованию на поверхности отливок прочной нейтральной оксидной пленки типа шпинели.

При добавке бора и повышении его содержания возрастает количество марганца в

первичных карбидах типа МС в 1,5 раза (с 0,91 до 1,37 %), в эвтектических карбидах (с 3,95 до 4,1 %), снижается его количество в металлической основе (с 3,72 до 3,44 %). Марганец, имеющий более высокое сродство к кислороду, чем железо, обладает большей диффузионной подвижностью в γ -железе, чем хром. Он в больших количествах попадает в окалину, но не образует на поверхности чугуна собственных оксидов, которые обладают защитными свойствами [10]. Входя в состав образующихся в оксидной пленке фаз типа шпинели, марганец увеличивает параметр кристаллической решетки, ослабляет силы межатомной связи и, таким образом, увеличивает проницаемость окалины, которая не обладает защитными свойствами уже при не слишком высоких температурах и снижает сопротивление металла окислению. При высоком содержании марганца в оксидной пленке толщина ее увеличивается, структура неоднородная, рыхлая. При низком содержании марганца оксидная пленка тонкая и плотная.

Растет содержание титана в первичных карбидах типа МС на 30 % (с 50,8 до 62,26 %), повышается его содержание в эвтектических карбидах в 1,7 раза (с 0,29 до 0,51 %). При увеличении содержания бора от 0,0005 до 0,02 % повышается количество железа в первичных карбидах типа МС в 3 раза (с 3,13 до 9,52 %), в эвтектических карбидах (с 31,34 до 32,23 %), в 1,2 раза падает содержание железа в металлической основе (с 75,87 до 61,54 %).

Для чугунов, залитых в кокиль (см. табл. 2), при повышении добавок бора снижается содержание хрома в первичных карбидах типа МС в 1,7 раза (с 11,73 до 6,81 %), в эвтектических карбидах незначительно (с 36,69 до 33,60 %), повышается концентрация хрома в металлической основе в 1,1 раза (с 14,5 до 15,98 %). Снижается количество марганца в первичных карбидах типа МС в 1,5 раза (с 1,8 до 1,2 %), повышается его содержание в эвтектических карбидах в 1,4 раза (с 2,71 до 3,82 %) и в 1,2 раза в металлической основе (с 2,74 до 3,22 %). Возрастает содержание титана в первичных карбидах типа МС в 1,2 раза (с 33,89 до 42,03 %), снижается его содержание в эвтектических карбидах в 1,2 раза (с 0,94 до 0,76 %), и он отсутствует в металлической основе. Снижается содержание железа в первичных карбидах типа МС в 1,4 раза (с 24,46 до 17,33 %), в эвтектических карбидах в 1,1 раза (с 38,18 до 36,06 %) и повыша-

ется незначительно его содержание в металлической основе (с 63,17 до 65,31 %).

При повышении скорости охлаждения в процессе кристаллизации (анализ проведен для образцов с добавками бора 0,02 %, залитых в ПГФ и кокиль) повышается содержание хрома в первичных карбидах типа МС в 1,2 раза (с 5,79 до 6,81 %), снижается его содержание в эвтектических карбидах в 1,1 раза (с 35,42 до 33,6 %) и в 1,1 раза в металлической основе (с 12,36 до 11,98 %). Снижается содержание марганца в первичных карбидах в 1,1 раза (с 1,37 до 1,20 %), в эвтектических карбидах в 1,1 раза (с 4,1 до 3,82 %) и в металлической основе в 1,1 раза (с 3,44 до 3,22 %).

Увеличение скорости охлаждения приводит к снижению содержания титана в первичных карбидах в 1,2 раза (с 52,26 до 42,03 %), повышается его концентрация в эвтектических карбидах в 1,5 раза (с 0,51 до 0,76 %), в металлической основе титана нет. Возрастает количество железа в первичных карбидах в 1,8 раза (с 9,52 до 17,33 %), в эвтектических карбидах в 1,1 раза (с 32,23 до 36,06 %) и в 1,1 раза в металлической основе (с 61,54 до 65,31 %). Количество никеля возрастает в 1,1 раза в металлической основе (с 1,4 до 1,52 %). В первичных и эвтектических карбидах никель отсутствует.

Заключение

Установлено, что перераспределение легирующих элементов хрома, марганца, никеля, титана в расплаве аустенита и в карбидной фазе под воздействием добавок бора оказывает положительное влияние на фазово-структурное состояние и эксплуатационные свойства сплавов.

Модифицирование бором в количестве 0,02 % привело к улучшению окалиностойкости в 3 раза по сравнению с ИЧ220Х18Г4НТ, ростоустойчивость сплавов повысилась на 30 %, так как вторичные карбиды выделяются в процессе охлаждения в литейной форме, поэтому при температурах испытаний не происходит деградации структуры,

Износостойкость повышается в 1,2–1,3 раза при добавке бора 0,02 %, так как первичные карбиды МС приобретают компактную форму (фактор формы 0,63–0,65), количество эвтектических карбидов возрастает до 25,5 и 29,9 % для чугунов, залитых в сухую ПГФ и кокиль соответственно.

Список литературы

1. Сильман Г.И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях. М.: Машиностроение, 2007. 302 с.
2. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М.: Metallurgia, 1986. 270 с.
3. Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А. Микролегирование и модифицирование жароизносостойких белых чугунов // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева: сборник статей Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева, Тюмень, 24–26 ноября 2022 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. Т. 2. С. 248–250.
4. Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Трофимова Е.А. Пути повышения специальных свойств комплексно-легированных белых чугунов // Теория и технология металлургического производства. 2023. № 1 (44). С. 24–29.
5. Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Рахматуллина Т.Р. Применение ПАЭ модификаторов для повышения механических и эксплуатационных свойств высокохромистых белых чугунов // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2021. № 20. С. 52–58.
6. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справ.: в 2 т. / под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987.
7. Шерман А.Д., Жуков А.А. Чугун: справ. изд. М.: Metallurgia, 1991. 576 с.
8. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
9. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Metallurgia, 1988. 256 с.
10. Kolokol'tsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Influence of Boron Modifications and Cooling Conditions during the Structural and Phase State Solidification of Heat- and Wear-Resistant White Cast Iron // Steel in Translation. 2019. Vol. 49, no. 11. P. 755–760. DOI: 10.3103/S096709121911007X

References

1. Silman G.I. *Termodinamika i termokinetika strukturoobrazovaniya v chugunakh i stalyakh* [Thermodynamics and thermokinetics of structure formation in cast irons and steels]. Moscow: Mashinostroenie; 2007. 302 p. (In Russ.)
2. Goldshteyn Ya.E., Mizin V.G. *Modifitsirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* [Modifying and microalloying of cast iron and steel]. Moscow: Metallurgiya; 1986. 270 p. (In Russ.)
3. Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Trofimova E.A. [Microalloying and modification of heat and wear resistant white cast irons] // In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference named after D.I. Mendeleev: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference named after D.I. Mendeleev, Tyumen, November 24–26, 2022. Vol. 2.* Tyumen: Tyumen Industrial University; 2023. P. 248–250. (In Russ.)
4. Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Trofimova E.A. Ways to increase the special properties of complex-alloyed white cast iron. *The Theory and process engineering of metallurgical production.* 2023;1(44):24–29. (In Russ.)
5. Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Rakhmatullina T.R. Application of PAE modifiers to improve the mechanical and operational properties of high-chromium white cast irons. *Technologies of metallurgy, mechanical engineering and material processing.* 2021;(20):52–58. (In Russ.)
6. Gerasimenko A.A. (Ed.) *Zashchita ot korrozii, stareniya i biopovrezhdeniy mashin, oborudovaniya i sooruzheniy: spravochnik: v 2 t.* [Protection against corrosion, aging and bio-damage of machines, equipment and structures: reference book: in 2 vol.]. Moscow: Mashinostroenie; 1987. (In Russ.)
7. Sherman A.D., Zhukov A.A. *Chugun: sprav. izd.* [Cast iron: reference book]. Moscow: Metallurgiya; 1991. 576 p. (In Russ.)
8. Garber M.E. *Iznosostoykie belye chuguny: svoystva, struktura, tekhnologiya, ekspluatatsiya* [Wear-resistant white cast irons: properties, structure, technology, operation]. Moscow: Mashinostroenie; 2010. 280 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Молочкова Ольга Сергеевна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; oetrochenko@mail.ru.

Петроченко Елена Васильевна, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; evp3738@mail.ru.

Information about the authors

Olga S. Molochkova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of Metallurgical Technology and Foundry Processes Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; oetrochenko@mail.ru.

Elena V. Petrochenko, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of Metallurgical Technology and Foundry Processes Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; evp3738@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 19.01.2024

The article was submitted 19.01.2024