

УДК 669.14.018.017:621.777.2

ВЛИЯНИЕ БОРА И ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЖАРОИЗНОСОСТОЙКИХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

*Колокольцев В.М., д.т.н., профессор, президент
Петроченко Е.В., д.т.н., профессор кафедры технологии металлургии
и литейных процессов
Молочкова О.С., к.т.н., доцент кафедры технологии металлургии
и литейных процессов (opetrochenko@mail.ru)*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. В работе изучено влияние модифицирования бором и температурных режимов охлаждения металла в литейной форме на фазовый состав, морфологию и химический состав структурных составляющих жароизносостойких белых чугунов системы Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti–Al–Nb. После добавления бора фазовый состав металлической основы изменился с двухфазной (α - и γ -фазы) на полностью однофазную (γ -фазу). Модифицирование бором повлияло на тип вторичных карбидов, вторичное твердение в форме происходило за счет выделения дисперсных карбидов ниобия (без бора – за счет карбидов хрома). Структура модифицированных чугунов – первичные комплексные карбиды (Ti, Nb, Cr, Fe)C, дендриты твердого раствора, эвтектика и вторичные карбиды MeC. Добавки бора изменяют химический состав первичных карбидов. В них снижается содержание ниобия с 42 до 3 % и увеличивается содержание титана с 22 до 66 %. В эвтектических карбидах содержание железа повышается, а хрома снижается. Методами количественной металлографии исследованы параметры первичных фаз – карбидов MeC и дендритов твердого раствора. Для оценки фактора формы F , который является критерием компактности первичных фаз, использовали специальную методику анализатора изображений Thixomet PRO. В качестве характеристик дендритной структуры применяли следующие параметры: дисперсность дендритной структуры δ , объемную долю дендритов V , расстояние между осями дендритов второго порядка λ_2 , фактор формы F , размеры дендритов (средние площадь S , длину l , ширину β). Применение предлагаемых характеристик (параметров) позволило не только количественно оценить дендритную структуру, но и определить степень модифицирования – относительное (в процентах) изменение каждого критерия в модифицированных чугунах по сравнению с немодифицированными, а также установить количественные соотношения степени модифицирования с условиями кристаллизации.

Ключевые слова: жароизносостойкие белые чугуны, модифицирование, температурные режимы охлаждения металла в литейной форме, структура, фазовый состав, химический состав фаз, вторичное твердение в форме, параметры фаз, фактор формы, степень модифицирования.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-11-887-893

ВВЕДЕНИЕ

Исследование влияния модифицирования бором и температурных режимов охлаждения металла в литейной форме на фазовый состав, морфологию [1 – 4] и химический состав структурных составляющих жароизносостойких белых чугунов имеет важное практическое значение [5 – 14]. Известно, что морфология первичных фаз (дендритов твердого раствора и карбидов) и эвтектик существенно влияет на механические и специальные свойства сплавов, например износостойкость, окалиностойкость, ростоустойчивость [15 – 20]. Оптимальные значения этих характеристик достигаются при определенных соотношениях размеров и формы структурных составляющих сплавов.

Сложнолегированные белые чугуны являются перспективным жароизносостойким материалом, где стабильность структуры и свойств в процессе работы являются одним из главных преимуществ для выбора данного материала [1, 4, 21, 22].

Литейные жароизносостойкие чугуны имеют специфическую структуру, сложный химический и фазовый состав. Комплексное легирование создает условия для формирования многофазной структуры, которая состоит из первичных карбидов и дендритов твердого раствора, эвтектик и вторичных карбидов. Эффективность многофазной микроструктуры в сопротивлении окислению и абразивному изнашиванию зависит от морфологии фаз, их количества и химического состава, а также типа, дисперсности и характера распределения упрочняющей фазы (карбидов первичных, эвтектических и вторичных) [21 – 24].

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 защитных функций в процессе эксплуатации и полному разрушению поверхности изделия.

Целью исследования является изучение влияния добавок бора и условий охлаждения сплавов в литейной форме на фазовый состав чугунов, химический состав фаз, структуру и параметры структурных составляющих.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом исследования в работе стал сложнолегированный белый чугун системы Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti–Al–Nb [2–3], модифицированный бором в количестве 0,005, 0,01, 0,02, 0,03 %. Сплавы выплавляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой и заливали в различные типы форм: сухие и сырые песчано-глинистые формы (ПГФ) и кокиль. При заливке в сухую ПГФ скорость охлаждения в интервале кристаллизации составляла 3–10 град/мин, в сырую ПГФ – 8–12 град/мин, в чугунный кокиль – до 30 град/мин.

Химический состав образцов определяли на эмиссионном спектрометре фирмы «Бэрд» и на спектрометре OBLF QSG 750.

Структуру и фазовый состав чугунов исследовали с помощью металлографического (световой микроскоп MEIJI 2700) и рентгенографического метода [1–4]. Рентгеновскую съемку осуществляли на дифрактометре ДРОН-УМ1 (в кобальтовом K_{α} излучении). Количественный металлографический анализ проводили с помощью анализатора изображений Thixomet PRO.

Химический состав фазовых составляющих в сплавах определяли на растровых электронных микроскопах «TESCAN VEGA II XMU» с микрорентгеноспектральными анализаторами [1–4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исходном состоянии без добавок бора фазовый состав чугуна представляет собой α -фазу (феррит), γ -фазу

(аустенит), карбиды типа Me_7C_3 и карбиды типа MeC . При затвердевании белого чугуна первыми из расплава кристаллизуются карбиды типа MeC , далее дендриты твердого раствора и последующая завершающая эвтектическая реакция происходит с образованием аустенитохромистокарбидной эвтектики [2–4].

Структура исходного чугуна состоит из избыточных комплексных карбидов ниобия с титаном (Nb, Ti)C, дендритов твердого раствора, эвтектики и вторичных карбидов Me_7C_3 .

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что после добавления бора изменился фазовый состав металлической основы с двухфазной (α - и γ -фазы) на полностью однофазную (γ -фазу). Структура модифицированных чугунов – первичные комплексные карбиды титана и ниобия, дендриты аустенита, эвтектика и вторичные карбиды NbC (рис. 1).

Модифицирование бором повлияло на тип вторичных карбидов, вторичное твердение в форме происходило за счет выделения дисперсных комплексных карбидов ниобия (без бора – за счет карбидов хрома) (см. рис. 1).

Микрорентгеноспектральные исследования показали, что первичные карбиды являются комплексными (Ti, Nb, Cr, Fe)C, добавки бора изменяют химический состав карбидов: снижается содержание ниобия с 42 до 3 % и увеличивается содержание титана с 22 до 66 %.

С добавлением бора меняется химический состав эвтектических карбидов. С увеличением добавок бора повышается содержание железа в эвтектических карбидах, а количество ниобия и хрома в них снижается.

Карбиды (Ti, Nb, Cr, Fe)C располагаются преимущественно в межосных пространствах дендритов аустенита. В работе изучены параметры первичной карбидной фазы чугунов (табл. 1).

Для оценки фактора формы F , который является критерием компактности первичных фаз, использова-

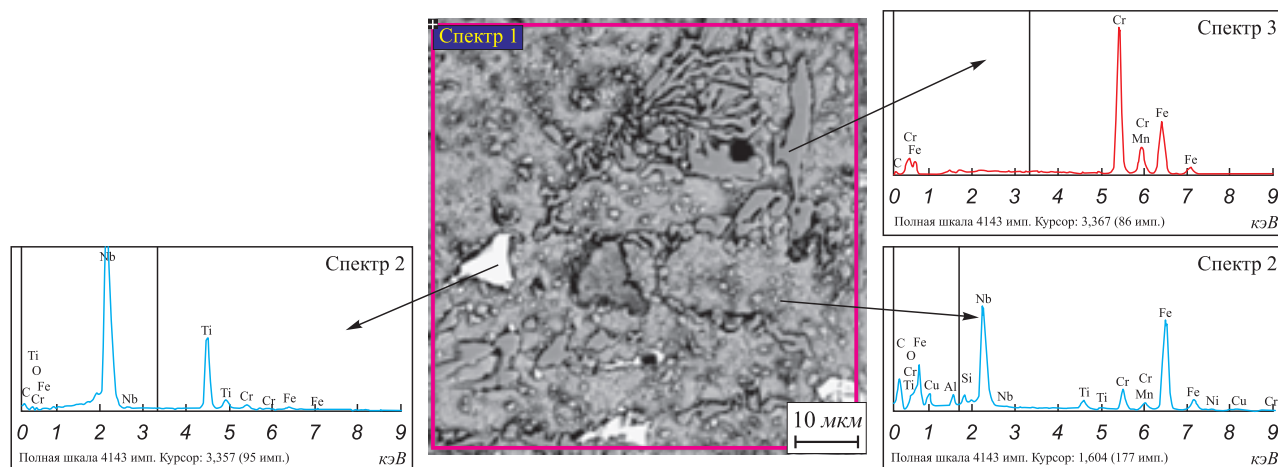


Рис. 1. Микроструктура чугуна с 0,005 % В (сухая ПГФ) и химический состав фаз

Fig. 1. Microstructure of cast iron with 0.005 % B (dry SLM) and chemical composition of phases

Параметры карбидов (Nb, Ti, Cr, Fe)C в зависимости от условий охлаждения

Table 1. Parameters of carbides (Nb, Ti, Cr, Fe)C depending on the cooling conditions

Содержание В, %	Тип формы	Параметры карбидной фазы MeC					
		Объемная доля V , %	Длина L , мкм	Площадь S , мкм ²	Расстояние между карбидами, мкм	Средний диаметр, мкм	Фактор формы F
0	Сухая ПГФ	3,41	3,430	16,34	99,0	11,20	0,51
	Сырая ПГФ	4,80	3,220	12,00	88,0	9,81	0,54
	Кокиль	5,41	1,310	4,57	27,0	8,51	0,60
0,005	Сухая ПГФ	3,16	2,350	1,23	158,0	4,88	0,63
	Сырая ПГФ	4,20	2,000	4,50	160,0	3,61	0,61
	Кокиль	4,26	1,020	0,90	90,0	2,41	0,66
0,010	Сухая ПГФ	2,87	2,130	4,23	230,0	4,73	0,62
	Сырая ПГФ	3,73	1,920	3,04	248,5	2,23	0,66
	Кокиль	3,94	0,990	0,92	136,7	1,80	0,67
0,020	Сухая ПГФ	2,63	1,520	2,58	253,0	4,30	0,63
	Сырая ПГФ	4,27	1,290	1,59	148,7	2,01	0,65
	Кокиль	4,17	0,901	0,78	108,6	1,57	0,65
0,030	Сухая ПГФ	3,17	1,530	2,83	174,8	4,65	0,65
	Сырая ПГФ	4,37	1,350	2,13	138,8	2,47	0,63
	Кокиль	4,77	1,100	1,64	81,8	1,99	0,62

ли специальную методику анализатора изображений Thixomet PRO. Фактор формы или фактор компактности F – это отношение периметра карбидных частиц к их площади. У карбидных частиц с сильно развитой поверхностью и, следовательно, сильным вкладом ее периметра, фактор формы меньше, чем у карбидов компактной формы. Чем больше F , тем компактнее карбиды. Форма карбидных включений с $F \geq 0,6$ близка к шаровидной.

Увеличение скорости охлаждения при затвердевании изменяет форму и размеры карбидов. Карбиды (Nb, Ti, Cr, Fe)C становятся менее разветвленными, увеличивается их дисперсность и компактность [2, 3].

При увеличении содержания бора в чугуне до 0,01 – 0,02 % уменьшается количество карбидов MeC (на 5 – 7 %), а также площадь и диаметр карбидов (в среднем в 2 раза при заливке в сухую ПГФ и 2 – 4 раза в кокиль) (см. табл. 1).

При первичной кристаллизации жидкость обогащается бором, поверхностно активные атомы которого адсорбируются на поверхностях кристаллов с образованием адсорбционных пленок, препятствующих диффузии атомов к поверхности кристаллов и тормозящих их рост. Сплав переохлаждается с последующим образованием мелкодисперсной структуры при кристаллизации. Меняется форма первичных карбидов от разветвленной к компактной, фактор формы F карбидов без добавок бора составляет 0,51 – 0,60 в разных

типах форм. При повышении содержания бора и скорости охлаждения при кристаллизации фактор формы F увеличивается и при добавке бора 0,01 – 0,02 % равен 0,62 – 0,67.

Положительное влияние модифицирования на параметры карбидов (Nb, Ti, Cr, Fe)C наблюдается при добавке бора до 0,02 %. Введение в состав большего количества модификатора приводит к укрупнению и росту карбидов и уменьшению фактора формы, т. е. к огрублению структуры. Таким образом, происходит снижение модифицирующего эффекта, называемого перемодифицированием или «старением» модифицирующего эффекта.

В зависимости от условий охлаждения и добавок бора при затвердевании чугунов образуются дендриты аустенита различной морфологии. В качестве характеристик дендритной структуры исследовали следующие параметры: дисперсность дендритной структуры δ ; объемную долю дендритов V ; расстояние между осями дендритов второго порядка λ_2 ; фактор формы F ; размеры дендритов (средние площадь S , длину l , ширину β) (табл. 2).

Дисперсность дендритной структуры δ определяется суммарным числом осных и межосных участков в единице длины. При подсчете ширины дендритов β измеряются дендритные оси низших порядков, изменение размеров которых определяет изменение дендритной структуры в целом.

Параметры дендритной структуры

Table 2. Parameters of dendrite structure

Содержание В, %	Тип формы	S , мкм ²	l , мкм	β , мкм	V , %	λ_2 , мкм	F	δ , мкм ⁻¹
0	Сухая ПГФ	2456	232	9,47	47,0	5,6 – 6,8	0,26	0,16
	Сырая ПГФ	1893	195	9,10	45,0	4,8 – 5,6	0,26	0,19
	Кокиль	89	41	2,21	44,6	1,0	0,28	1,00
0,005	Сухая ПГФ	2416	201	9,15	44,5	5,2 – 7,1	0,28	0,16
	Сырая ПГФ	1831	191	9,38	46,8	5,4	0,30	0,18
	Кокиль	85	38,8	2,10	40,0	0,9	0,32	1,10
0,010	Сухая ПГФ	1912	198	9,18	44,6	4,9 – 6,3	0,29	0,19
	Сырая ПГФ	1714	185	8,95	45,6	2,8 – 3,2	0,30	0,33
	Кокиль	36	19	1,89	37,0	–	0,33	–
0,020	Сухая ПГФ	1581	130	10,50	45,0	2,5 – 3,8	0,34	0,18
	Сырая ПГФ	1568	92	9,58	51,0	3,2	0,35	0,31
	Кокиль	35	17	1,70	39,0	–	0,50	–
0,030	Сухая ПГФ	1316	180	10,90	46,0	2,5 – 4,5	0,34	0,17
	Сырая ПГФ	1718	132	9,84	47,2	4,1	0,39	0,24
	Кокиль	77	32	2,27	41,8	–	0,45	–

Предлагаемые параметры позволяют проводить количественную оценку дендритной структуры чугунов в зависимости от условий кристаллизации и добавок бора. Эти параметры целесообразно применять в тех случаях, когда какой-либо из факторов кристаллизации подвергается изменению (скорость охлаждения, модифицирующие добавки). С помощью количественной оценки дендритной структуры можно не только сравнивать относительное действие разных факторов, но и находить рациональные пределы применения того или иного фактора. Применение предлагаемых параметров позволяет количественно оценить дендритную структуру, а также определить степень модифицирования – относительное (в процентах) изменение каждого критерия в модифицированных чугунах по сравнению с немодифицированными.

Определение степени модифицирования представляется в ряде случаев полезным, например, для установления возможных количественных соотношений степени модифицирования с условиями кристаллизации. Так, относительное изменение параметра β при добавке 0,01 % В составляет 3,1; 9,0 и 23,1 % в сухую, сырую ПГФ и кокиль соответственно. Степень модифицирования параметра l при добавке 0,02 % В – 44,0; 52,8; 58,5 %. Степень влияния скорости охлаждения без добавок бора – 15,9 – 78,9 % на параметр l и 3,91 – 75,7 % на параметр β .

При модифицировании объемная доля дендритов аустенита не меняется. С увеличением скорости охлаждения (заливка в кокиль) объемная доля дендритов уменьшилась в среднем на 20 %.

Исследования морфологии эвтектики и эвтектических карбидов показали, что увеличение добавок бора способствует уменьшению размеров эвтектических карбидов и эвтектических колоний и росту их количества во всех типах форм. С повышением скорости охлаждения (заливка в кокиль) уменьшаются размеры первичных карбидов, дендритов аустенита и растет объемная доля эвтектики (рис. 2).

На периферии отливки объемная доля эвтектики возрастает по сравнению с центром отливки (с 51 до 65 %), а объемная доля дендритов аустенита уменьшается (с 48 до 35 %). В этой области дендриты аустенита представляют собой отдельные почти равноосные неразветвленные зерна. Протяженность этой зоны тем больше, чем выше скорость охлаждения (заливка в кокиль). При исследовании изменения морфологии дендритов вглубь отливки наблюдается формирование дендритов более высокого порядка. В центре вновь преобладают равноосные дендриты. Бор незначительно меняет объемную долю дендритов.

Повышение скорости охлаждения уменьшает объемную долю и площадь дендритов. В отливках, полученных в сухой ПГФ, расстояние между осями второго порядка находится в диапазоне 2,5 – 7,0 мкм. Это расстояние уменьшается с увеличением добавок бора. При охлаждении в металлической форме оси высших порядков либо полностью отсутствуют, либо присутствуют в неразвитом (неявном) виде (междуосное расстояние в этом случае составляет около 1 мкм), компактность дендритов увеличивается.

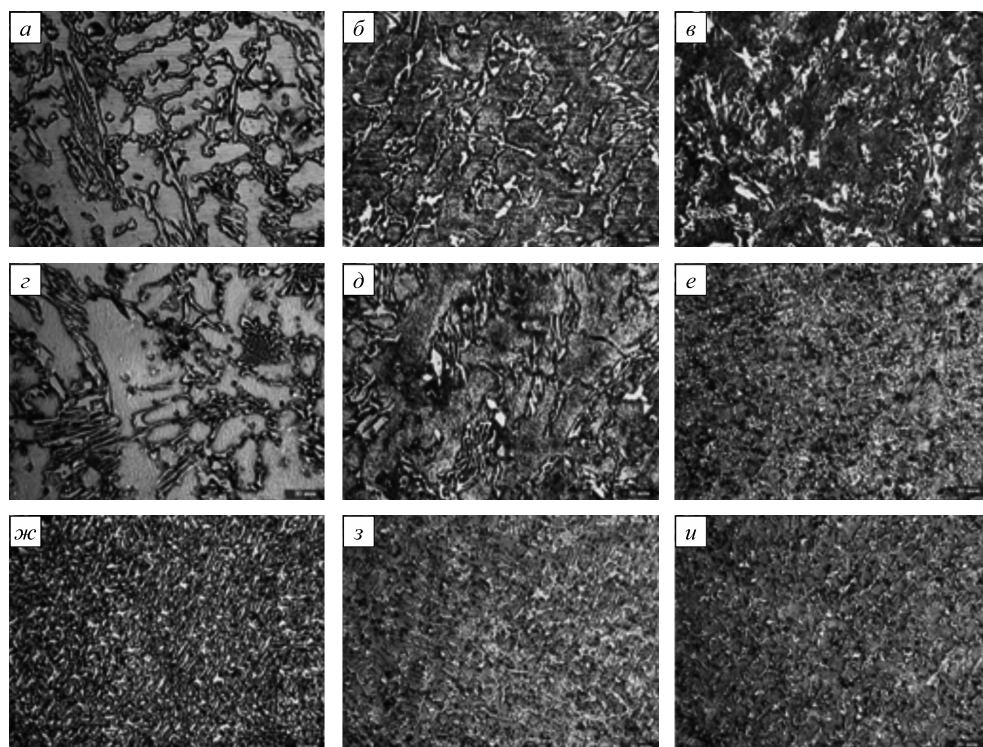


Рис. 2. Панорамные изображения структуры чугунов до и после модифицирования бором, залитых в разные типы форм: *a* – 0 % В, сухая ПГФ; *б* – 0,005 % В, сухая ПГФ; *в* – 0,03 % В, сухая ПГФ; *г* – 0 % В, сырая ПГФ; *д* – 0,005 % В, сырая ПГФ; *е* – 0,03 % В, сырая ПГФ; *ж* – 0 % В, кокиль; *з* – 0,005 % В, кокиль; *и* – 0,03 % В, кокиль

Fig. 2. Panoramic images of structures of cast iron after casting in different mold types, before and after boron modification: *a* – 0 % B, dry SLM; *б* – 0.005 % B, dry SLM; *в* – 0.03 % B, dry SLM; *г* – 0 % B, wet SLM; *д* – 0.005 % B, wet SLM; *е* – 0.03 % B, wet SLM; *ж* – 0 % B, block mold; *з* – 0.005 % B, block mold; *и* – 0.03 % B, block mold

Выводы

Особенность влияния бора состоит в том, что он одновременно воздействует на количество, размеры и форму структурных составляющих белых чугунов, их фазовый и химический состав.

При модифицировании бором жароизносостойких белых чугунов системы Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti–Al–Nb изменился фазовый состав металлической основы с двухфазной (α - и γ -фазы) на полностью однофазную (γ -фазу). Структура модифицированных чугунов представляет собой первичные комплексные карбиды титана (Ti, Nb, Cr, Fe)C, дендриты твердого раствора, аустенитнохромистокарбидную эвтектику и вторичные карбиды NbC.

С добавлением бора существенно изменился химический состав первичных и эвтектических карбидов: значительно снизилось содержание ниобия с 44 до 2 %, а содержание титана в первичных карбидах (Ti, Nb, Cr, Fe)C выросло с 24 до 65 %. В результате аустенит оказывается пересыщенным ниобием и вторичное твердение в форме происходит за счет выделения дисперсных карбидов NbC.

Методами количественной металлографии исследованы параметры первичных фаз – карбидов MeC и дендритов твердого раствора: фактор формы F , кото-

рый является критерием компактности первичных фаз; дисперсность дендритной структуры δ ; объемная доля дендритов V ; расстояние между осями дендритов второго порядка λ_2 ; размер дендритов (средняя площадь S , длина l , ширина β). Применение предлагаемых характеристик (параметров) позволило не только количественно оценить дендритную структуру, но и определить степень модифицирования – относительное (в процентах) изменение каждого критерия в модифицированных чугунах по сравнению с немодифицированными чугунами, а также установить количественные соотношения степени модифицирования с условиями кристаллизации. Определено, что скорость охлаждения эффективнее влияет на параметр l (15,9 – 78,9 %) и на параметр β (3,91 – 75,7 %). На фактор формы влияние бора сильнее, степень модифицирования параметра F при добавке 0,02 % В составляет 47 %. Степень влияния скорости охлаждения на параметр F без добавок бора 7,7 %. Также показано, что с увеличением скорости охлаждения при затвердевании снижается влияние бора на параметры дендритной структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петrochenko E.B. Особенности кристаллизации, формирования структуры и свойств износостойких и жаростойких чугунов в

- различных условиях охлаждения: Дис. ... д-ра техн. наук. – Магнитогорск, 2012. – 310 с.
2. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Ахметова А.А. Влияние бора на структуру и свойства жароизносостойких чугунов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Матер. 72-й межрег. науч.-техн. конф. / Под. ред. В.М. Колокольцева. Т. 1. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. С. 101 – 105.
 3. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочкова О.С., Ахметова А.А. Количественные характеристики дендритной структуры жароизносостойких белых чугунов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Матер. 74-й межрег. науч.-техн. конф. / Под.ред. В.М. Колокольцева. Т. 1. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2016. С. 140 – 144.
 4. Молочкова О.С. Выбор состава и исследование структуры, свойств жароизносостойких комплексно-легированных белых чугунов: Дис... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2012. – 123 с.
 5. Tasgin Yahya, Kaplan Mehmet, Yaz Mehmet. Investigation of effects of boron additives and heat treatment on carbides and phase transition of highly alloyed duplex cast iron // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30. P. 3174 – 3179.
 6. Hufenbach J., Kunze K., Giebel L. etc. The effect of boron on microstructure and mechanical properties of high-strength cast FeCrVC // *Materials Science & Engineering A*. 2013. Vol. 586. P. 267 – 275.
 7. Xiang Chen, Yanxiang Li. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron // *Materials Science and Engineering A*. 2010. Vol. 528. P. 770 – 775.
 8. Peng Yun-Cheng, Jin Hui-Jin, Liu Jin-Hai, Li Guo-Lu. Effect of boron on the microstructure and mechanical properties of carbidaustempered ductile iron // *Materials Science and Engineering A*. 2011. Vol. 529. P. 321 – 325.
 9. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Influence of complex V, Cu, Ti and B alloying on structural and phase state, mechanical properties and wear resistance of white cast iron // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 1. P. 23 – 15.
 10. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Influence of boron modification and cooling conditions during solidification on structural and phase state of heat- and wear-resistant white cast iron // *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 15. P. 11 – 15.
 11. Correa R., Bedolla-Jacuinde A., Mejia I. etc. Effect of boron on microstructure of directionally solidified high chromium white irons // *International Journal of Cast Metals Research*. 2011. Vol. 24. No. 1. P. 37 – 44.
 12. Correa R., Bedolla-Jacuinde A., Zuno-Silva J. etc. Effect of boron on the sliding wear of directionally solidified high-chromium white irons // *Wear*. 2009. Vol. 267. No. 1 – 4. P. 495 – 504.
 13. Petrovic S.T., Markovic S., Pavlovic Z.A. The effect of boron on the stereological characteristics of the structural phases present in the structure of the 13% Cr white iron // *Journal of Materials Science*. 2003. Vol. 38. No. 15. P. 3263 – 3268.
 14. Villanueva-Perez O.E., Mejia I., Garcia-Garcia V., Bedolla-Jacuinde A. Metallographic, structural and mechanical characterization of a low density Fe–Mn–Al–C steel microalloyed with Ti/B in as-cast and homogenized conditions // *MRS Advances*. 2018. Vol. 3. No. 64. P. 3971 – 3978.
 15. Gromczyk M., Kondracki M., Studnicki A., Szajnar J. Stereological analysis of carbides in hypoeutectic chromium cast iron // *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15. No. 2. P. 17 – 22.
 16. Гушин Н.С., Куликов В.И., Нуралиев Ф.А., Тахиров А.А. Износостойкие легированные хромом чугуны со специальными свойствами // *Литейное производство*. 2015. № 4. С. 7 – 11.
 17. Александров М.В. Формирование структуры и абразивная износостойкость литого композиционного материала системы легированный белый чугун – TiC // *Литейщик России*. 2015. № 2. С. 29 – 34.
 18. Bedolla-Jacuinde A., Correa R., Quezada J.G., Maldonado C. Effect of titanium on the as-cast microstructure of a 16% chromium white iron // *Materials Science and Engineering A*. 2005. Vol. 398. P. 297 – 308.
 19. Zhi X., Xing J., Fu H., Xiao B. Effect of niobium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron // *Materials Letters*. 2008. Vol. 62. No. 6 – 7. P. 857 – 860.
 20. Satoh T., Liu H.-N., Sakamoto M., Kawakami Y. High temperature properties of a high-chromium cast iron and its composites fabricated via powder metallurgy process // *Journal of Materials Science*. 2005. Vol. 40. No. 12. P. 3283 – 3286.
 21. Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron // *Journal Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013. Vol. 44F. P. 1665 – 1671.
 22. Yoganandh J., Natarjan S., Kumaresh Babu S.P. Erosive wear behavior of nickel-based high alloy white cast iron under mining conditions using orthogonal array // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013. Vol. 22. No. 9. P. 2534 – 2540.
 23. Bedolla-Jacuinde A., Arias L., Hernández B. Kinetics of secondary carbides precipitation in a high-chromium white iron // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2003. Vol. 12. No. 4. P. 371 – 382.
 24. Janus A. Effect of chemical composition on number of eutectic colonies in Ni–Mn–Cu cast iron // *Archives of Foundry Engineering*. 2013. Vol. 13. No. 1. P. 51 – 56.

Поступила в редакцию 4 августа 2018 г.

После доработки 12 сентября 2019 г.

Принята к публикации 25 сентября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 11, pp. 887–893.

INFLUENCE OF BORON MODIFICATION AND COOLING CONDITIONS DURING SOLIDIFICATION ON STRUCTURAL AND PHASE STATE OF HEAT- AND WEAR-RESISTANT WHITE CAST IRON

V.M. Kolokol'tsev, E.V. Petrochenko, O.S. Molochkova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The paper is devoted to examination of the effect of boron modification and temperature conditions for metal cooling in a mold on phase composition, morphology and chemical composition of structural components of heat- and wear-resistant white cast iron of Fe–C–Cr–Mn–Ni–Ti–Al–Nb system. The phase composition of the metallic base changed from the dualphase (α - and γ -phases) to the

completely single-phase (γ -phase). Boron modification influenced on the type of secondary carbides, while secondary hardening in a mold occurs through extraction of dispersed niobium carbides (without boron, but with chromium carbides). The structure of modified cast iron is presented by the primary complex carbides (Ti, Nb, Cr, Fe)₃C, as well as by solid solution dendrites, eutectics and secondary carbides MeC. Boron addition changes the chemical composition of primary carbides with decrease of niobium content from 44 to 2 % and increase of titanium content from 24 to 65 %; content of eutectic carbides rises as well. As for hypereutectic carbides, they are characterized by increase of ferrum content and lowering of chrome content. Parameters

of the primary phases (*MeC* carbides and solid solution dendrites) were investigated using the methods of quantitative metallography. The special technique of Thixomet PRO image analyzer was used for evaluation of the *F* form factor which is the criterion of compatibility of the primary phases. The following parameters were used in this work as the parameters of dendrite structure: dispersity of the dendrite structure (δ), volumetric part of dendrites (*V*), distance between the axes of second order dendrites (λ_2), form factor (*F*), average dimensions of dendrites – square (*S*), length (*l*) and width (β). All the suggested characteristics (parameters) allowed not only to provide quantitative evaluation of the dendrite structure, but also to determine modification degree as relative variation (in %) of each criterion in modified cast iron in comparison with non-modified iron. Quantitative relation between modification degree and crystallization conditions were established as well.

Keywords: heat- and wear-resistant white cast iron, modification, temperature conditions, metal cooling, mold, structure, phase composition, chemical composition, secondary hardening, phase parameters, form factor, modification degree.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-11-887-893

REFERENCES

- Petrochenko E.V. *Osobennosti kristallizatsii, formirovaniya struktury i svoystv iznosostoikikh i zharostoikikh chugunov v razlichnykh usloviyakh okhlazhdeniya: dis. ... doktora tekhn. nauk* [Features of crystallization, formation of structure and properties of wear-resistant and heat-resistant irons in various cooling conditions: Dr. Tech. Sci. Diss.]. Magnitogorsk: 2012, 310 p. (In Russ.).
- Kolokol'tsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Akhmetova A.A. Influence of boron on the structure and properties of heat-resistant cast irons. In: *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 72-i mezhhreg. nauch.-tekhn. konf.* [Actual Problems of Modern Science, Technology and Education: Materials of the 72nd Interreg. Sci.-Tech. Conf.]. Kolokol'tsev V.M. ed. Vol. 1. Magnitogorsk: Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2014, pp. 101–105. (In Russ.).
- Kolokol'tsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S., Akhmetova A.A. Quantitative characteristics of the dendritic structure of wear-resistant white cast irons. In: *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 74-i mezhhreg. nauch.-tekhn. konf.* [Actual Problems of Modern Science, Technology and Education: Materials of the 72nd Interreg. Sci.-Tech. Conf.]. Kolokol'tsev V.M. ed. Vol. 1. Magnitogorsk, Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2016, pp. 140–144. (In Russ.).
- Molochkova O.S. *Vybor sostava i issledovanie struktury, svoystv zharoiznosostoikikh kompleksno-legirovannykh belykh chugunov: dis... kand. tekhn. nauk* [Choice of composition and study of the structure, properties of heat-resistant complex-alloyed white irons: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Magnitogorsk, 2012. (In Russ.).
- Tasgin Yahya, Kaplan Mehmet, Yaz Mehmet. Investigation of effects of boron additives and heat treatment on carbides and phase transition of highly alloyed duplex cast iron. *Materials and Design*. 2009, vol. 30, pp. 3174–3179.
- Hufenbach J., Kunze K., Giebeler L., Gemming T., Wendrock H., Baldauf C., Kühn U., Hufenbach W., Eckert J. The effect of boron on microstructure and mechanical properties of high-strength cast FeCrVC. *Materials Science & Engineering A*. 2013, vol. 586, pp. 267–275.
- Xiang Chen, Yanxiang Li. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high boron white cast iron. *Materials Science and Engineering A*. 2010, vol. 528, pp. 770–775.
- Peng Yun-Cheng, Jin Hui-Jin, Liu Jin-Hai, Li Guo-Lu. Effect of boron on the microstructure and mechanical properties of carbidic austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering A*. 2011, vol. 529, pp. 321–325.
- Kolokol'tsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Influence of complex V, Cu, Ti and B alloying on structural and phase state, mechanical properties and wear resistance of white cast iron. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 1, pp. 23–15.
- Kolokol'tsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Influence of boron modification and cooling conditions during solidification on structural and phase state of heat- and wear-resistant white cast iron. *CIS Iron and Steel Review*. 2018, vol. 15, pp. 11–15.
- Correa R., Bedolla-Jacuinde A., Mejía I., Cardoso E., Hernández B. Effect of boron on microstructure of directionally solidified high chromium white irons. *International Journal of Cast Metals Research*. 2011, vol. 24, no. 1, pp. 37–44.
- Correa R., Bedolla-Jacuinde A., Zuno-Silva J., Cardoso E., Mejía I. Effect of boron on the sliding wear of directionally solidified high-chromium white irons. *Wear*. 2009, vol. 267, no. 1-4, pp. 495–504.
- Petrovic S.T., Markovic S., Pavlovic Z.A. The effect of boron on the stereological characteristics of the structural phases present in the structure of the 13% Cr white iron. *Journal of Materials Science*. 2003, vol. 38, no. 15, pp. 3263–3268.
- Villanueva-Perez O.E., Mejía I., García-García V., Bedolla-Jacuinde A. Metallographic, structural and mechanical characterization of a low density Fe–Mn–Al–C steel microalloyed with Ti/B in as-cast and homogenized conditions. *MRS Advances*. 2018, vol. 3, no. 64, pp. 3971–3978.
- Gromczyk M., Kondracki M., Studnicki A., Szajnar J. Stereological analysis of carbides in hypoeutectic chromium cast iron. *Archives of Foundry Engineering*. 2015, vol. 15, no. 2, pp. 17–22.
- Gushchin N.S., Kulikov V.I., Nuraliev F.A., Takhirov A.A. Wear-resistant chrome-alloyed cast irons with special properties. *Liteinoe proizvodstvo*. 2015, no. 4, pp. 7–11. (In Russ.).
- Aleksandrov M.V. Structure formation and abrasive wear resistance of cast composite material system alloyed white cast iron-TiC. *Liteishchik Rossii*. 2015, no. 2, pp. 29–34. (In Russ.).
- Bedolla-Jacuinde A., Correa R., Quezada J.G., Maldonado C. Effect of titanium on the as-cast microstructure of a 16 % chromium white iron. *Materials Science and Engineering A*. 2005, vol. 398, pp. 297–308.
- Zhi X., Xing J., Fu H., Xiao B. Effect of niobium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron. *Materials Letters*. 2008, vol. 62, no. 6-7, pp. 857–860.
- Satoh T., Liu H.-N., Sakamoto M., Kawakami Y. High temperature properties of a high-chromium cast iron and its composites fabricated via powder metallurgy process. *Journal of Materials Science*. 2005, vol. 40, no. 12, pp. 3283–3286.
- Sain P.K., Sharma C.P., Bhargava A.K. Microstructure aspects of a newly developed, low cost, corrosion-resistant white cast iron. *Journal Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013, vol. 44F, pp. 1665–1671.
- Yoganandh J., Natarjan S., Kumaresh Babu S.P. Erosive wear behavior of nickel-based high alloy white cast iron under mining conditions using orthogonal array. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013, vol. 22 (9), pp. 2534–2540.
- Bedolla-Jacuinde A., Arias L., Hernández B. Kinetics of secondary carbides precipitation in a high-chromium white iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2003, vol. 12, no. 4, pp. 371–382.
- Janus A. Effect of chemical composition on number of eutectic colonies in Ni–Mn–Cu cast iron. *Archives of Foundry Engineering*. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 51–56.

Information about the authors:

V.M. Kolokol'tsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President

E.V. Petrochenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgical Technology and Foundry Processes

O.S. Molochkova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metallurgical Technology and Foundry Processes

(opetrochenko@mail.ru)

Received August 4, 2018

Revised September 12, 2019

Accepted September 25, 2019