

Отредакции

Научная школа МГТУ им. Г.И. Носова «Развитие теории и технологий металлургического производства» в рамках специальности 05.16.04 «Литейное производство» одинаково успешно развивает фундаментальную и прикладную науку. Научные разработки магнитогорских ученых под руководством Колокольцева В.М. широко известны мировой научной общественности. Создано более десятка монографий, два учебника, шесть грифованных учебных пособий, около 100 изобретений совместно с производственниками – В.Ф. Рашиковым, В.В. Бахметьевым, Р.Х. Гималетдиновым, С.В. Цыбровым; отечественными и зарубежными учеными Ри Хосеном, Ри Э.Х., Тэн Э.Б., Збигневым Конопкой, Е.В. Ковалевичем и многими другими.

УДК 669.15-196

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЕЛЫХ ЧУГУНОВ РАЗНЫХ СИСТЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

Колокольцев В.М.¹, Конопка З.², Петроченко Е.В.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

² Ченстоховский технологический университет, Польша

Аннотация. Изучены особенности формирования структуры и свойств белых чугунов разных систем легирования в зависимости от химического состава и условий охлаждения при затвердевании. Установлены особенности влияния химического состава, температурных режимов охлаждения сплавов в литейной форме на структуру металлической основы, тип карбидной фазы, морфологию эвтектических композиций, механические свойства, износостойкость и жаростойкость комплексно-легированных белых чугунов (КЛБЧ).

Ключевые слова: белые чугуны, микроструктура, эвтектические композиции, карбидная фаза, металлическая основа, фазовый состав, химический состав фаз, износостойкость, жаростойкость.

Введение

Белые легированные чугуны широко используют как материал для инструмента и деталей машин и механизмов, подвергающихся интенсивному изнашиванию и окислению [1-4]. Современные белые чугуны – сложнолегированные многокомпонентные сплавы, различные по структуре и специальным свойствам. Они представляют собой отдельную группу промышленных чугунов, при затвердевании которых формируется композиционная структура. Именно она определяет специфические свойства белых чугунов в литом состоянии.

Несмотря на обилие литературных данных [5-7], до сих пор актуальны исследования по изучению влияния легирующих элементов и условий охлаждения на процессы кристаллизации и структурообразования, механические и эксплуатационные (жаростойкость, износостойкость) свойства этих чугунов. Особенно это касается условий формирования различных эвтектик и карбидной фазы при наличии в составе чугуна нескольких карбидообразующих элементов и модификаторов.

1. Материалы и методы исследования

Исследования проводили на белых чугунах, легированных ванадием и комплексами V-C-Cu-Ti-B, V-Cr, Cr-Mn-Ni-Ti, Cr-Mn-Ni-Al, Cr-Mn-Ni-Nb. Экспериментальные сплавы выплавляли в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой и заливали в сухие и сырье песчано-глинистые формы (ПГФ) и кокиль.

Структуру и фазовый состав чугунов, оксидных слоев исследовали с помощью металлографического и

рентгенографического методов. Рентгеновская съемка производилась на дифрактометре ДРОН-УМ1 (в кобальтовом Ка излучении). Обработка экспериментальных данных производилась по комплексу КО-ИМЕТ. Фазовый анализ осуществлялся с помощью программы XRAYAN и базы данных PDF.

Количественный металлографический анализ, автоматизированную обработку результатов измерения микротвердости проводили с помощью анализаторов изображений Thixomet PRO, Siams.

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

Жаростойкость оценивали по двум показателям: окалиностойкости и ростоустойчивости (ГОСТ 6130-71 и 7769-82).

Сравнительные испытания на износостойкость сплавов и чугунов при трении о нежестко закрепленные (полузакрепленные) абразивные частицы проводили по методике, регламентированной ГОСТ 23.208-79. Изнашивание проводилось абразивными частицами различной твердости (электрокорундом и периклазом), что определяло различные механизмы изнашивания.

2. Результаты исследования и их обсуждение

Исследовали структуру и износостойкость тройных сплавов Fe-V-C при следующем соотношении компонентов, масс. %: 2,0-3,5 C; 3,0-9,0 V. Фазовый состав ванадиевых чугунов в литом состоянии представляет собой α (ОЦК)-фазу, карбид ванадия VC и

карбид железа Fe_3C . Две карбидные фазы определяют образование двух эвтектических композиций: двойной – аустенитно-ванадиевокарбидной ($\gamma + \text{VC}$) и тройной ледебуритоподобной ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C} + \text{VC}$). Выделяется эта составляющая по границам колоний двойной эвтектики ($\gamma + \text{VC}$) [8].

В ванадиевых чугунах в зависимости от химического состава сплава и условий охлаждения формируются следующие структуры: структура, состоящая из дендритов аустенита (или продуктов его распада) и тройной эвтектики $\gamma + \text{Fe}_3\text{C} + \text{VC}$ (рис. 1, а, б); полностью инвертированная структура эвтектики $\gamma + \text{VC}$ (рис. 1, г, д); структура, состоящая из двух эвтектик $\gamma + \text{VC}$ и $\gamma + \text{Fe}_3\text{C} + \text{VC}$ (рис. 1, в, е).

Наиболее высокие значения прочности, твёрдости и износостойкости по корунду КИ ши периклазу КП достигаются у сплавов, залитых в кокиль: ПГФ – 500-550 МПа; 40-45 HRC; 4-5 ед. КИ; 12-15 ед. КП; кокиль – 550-600 МПа; 45-55 HRC, 5-7 ед. КИ; 15-18 ед. КП. Учитывая этот факт и зная характеристики отливок (масса, толщина стенки, габаритные размеры) и тип формы, можно регулировать содержание ванадия и углерода в сплаве и получать требуемые свойства. Это позволяет более широко использовать белые ванадиевые чугуны для производства отливок.

Определены концентрационные интервалы по углероду и ванадию (2,6-3,0% С и 5,0-8,0% V), обеспечивающие максимальную износостойкость ванадиевых чугунов в различных условиях абразивного изнашивания. Одновременно достичь достаточно высокой износостойкости и полностью инвертированной структуры чугунов с базовой композицией Fe-V невозможно при легировании одним ванадием вследствие неполной инверсии эвтектики и формирования перлитной структуры металлической основы.

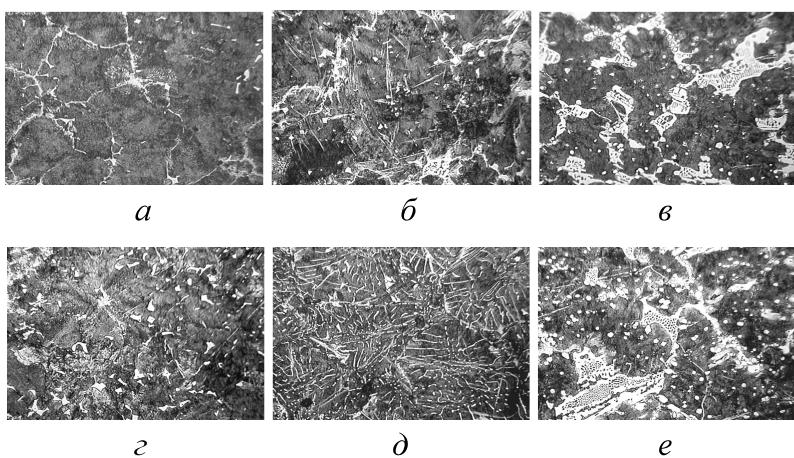


Рис. 1. Микрофотографии структур ванадиевых чугунов, $\times 500$

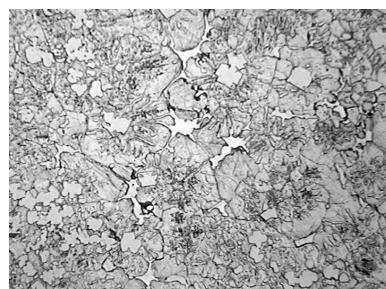
Дополнительное легирование ванадиевых чугунов Ti, Cu, В и увеличение скорости охлаждения при затвердевании (заливка в кокиль) значительно сокращает (вплоть до исчезновения) количество ледебурита, увеличивает объемную долю карбидов VC и $(\text{Ti}, \text{V})\text{C}$ (в 2-3 раза). Содержание этих элементов в исследуе-

мых чугунах было следующим, масс. %: углерод – 2,6-3,0; ванадий – 5,0-8,0; медь – 0,8-1,2; титан 0,3-0,6; бор – 0,01-0,05.

Увеличение скорости охлаждения при затвердевании и содержания Ti в карбидах изменяет их форму и размеры (рис. 2). Карбиды $(\text{Ti}, \text{V})\text{C}$ становятся менее разветвленными, увеличивается дисперсность карбидов $(\text{Ti}, \text{V})\text{C}$, двойной эвтектики и содержание в ней карбидной фазы



а



б

Рис. 2. Структура комплексно-легированных ванадиевых чугунов: а – ПГФ; б – кокиль

При испытании по корунду основным механизмом изнашивания является микрорезание, а при взаимодействии чугуна с периклазом разрушение основы происходит по механизму пластического оттеснения. Наивысшей износостойкостью при износе по механизму микрорезания обладают чугуны с преимущественно мартенситной структурой, при изнашивании по механизму пластического оттеснения – с аустенитно-мартенситной структурой. Структура металлической основы изменяется от перлитной (ПГФ) до мартенситно-аустенитной (кокиль). Вследствие этого износостойкость комплексно-легированных чугунов по периклазу повышается в 1,5-2,0 раза по периклазу и 2-4 раза по корунду. В зависимости от условий охлаждения в форме изменяются концентрационные интервалы С, V, Ti, Cu, В, обеспечивающие одинаковый уровень механических свойств и износостойкости [9].

По результатам исследования определены типы эвтектик и структур чугунов с базовой композицией

Fe-V в зависимости от химического состава и скорости охлаждения. Предложены оптимальные для различных условий изнашивания составы комплекснолегированных ванадиевых чугунов.

В чугунах с базовой композицией Fe-Cr-V образуются две двойных эвтектики $\gamma + VC$ (рис. 3, а), $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ (рис. 3, б) и тройная $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$. Содержание этих элементов в исследуемых чугунах было следующим, масс. %: хром – 14,0-20,0; ванадий – 3,0-9,0; углерод – 2,6-3,2.

Металлическая основа чугунов состоит из аустенита и мартенсита, соотношение этих фаз, состав карбидов и металлической основы зависит от химического состава сплава и типа литейной формы (см. таблицу). Например, карбиды $(Fe, Cr, V)_7C_3$ содержат 26,0-48,0% железа, 41,0-52,0% хрома, 9,0-22,0% ванадия, карбид ванадия ограниченно растворяет железо (до 2,0-5,0%), несколько больше – хром (8,0-16,0%). Износстойкость хромованадиевых чугунов зависит от микротвердости металлической основы, объема карбидной фазы, доли аустенита и его метастабильности по отношению к деформационному мартенситному превращению.

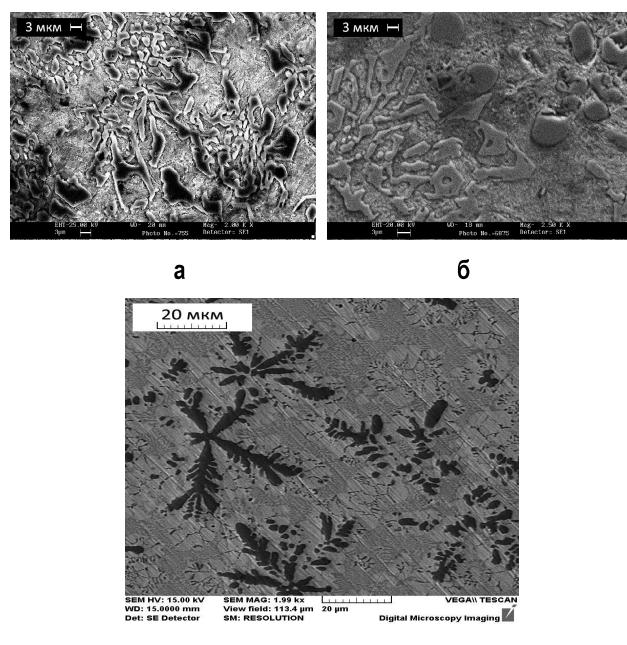


Рис. 3. Двойные эвтектики $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ (а) и $\gamma + VC$ (б); дендриты первичных карбидов ванадия (в)

От соотношения хрома и ванадия в чугунах зависит состав, строение и свойства карбидной фазы. При избыточном содержании углерода и легирующих элементов образуются массивные разветвленные дендриты первичных карбидов ванадия (рис. 3, в).

Увеличение хрома в сплаве вызывает снижение содержания ванадия в составе карбидов VC и $(Fe, Cr, V)_7C_3$, что проявляется в снижении микротвердости карбидов ванадия от 22 до 18 ГПа и комплексных карбидов хрома от 16 до 10 ГПа. Увеличение концентрации ванадия и углерода в сплаве снижает содержа-

ние железа в карбидах и повышает содержание ванадия и хрома. В результате микротвердость карбидов $(Fe, Cr, V)_7C_3$ повышается до 16-17 ГПа.

Увеличение скорости охлаждения приводит к следующему изменению состава карбидов: снижает содержание хрома с 10 до 8% в карбиде VC; увеличивает содержание железа с 37 до 47% и уменьшает содержание хрома с 51 до 41% в комплексном карбиде $(Fe, Cr, V)_7C_3$. В результате степень легированности металлической основы увеличивается.

Объем карбидной фазы в эвтектиках $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ составляет 28–36%, в эвтектике A + VC карбидов меньше – 10-15%. Различие в строении эвтектик определяет их разные свойства.

В зависимости от состава хромованадиевых чугунов формируются 5 типов структур сплавов (структурных классов): 1 – доэвтектическая, состоящая из избыточных дендритов аустенита (или продуктов его распада) и тройной эвтектики $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 2 – структура, состоящая из двух эвтектик $\gamma + VC$ (сферолитная форма) и $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 3 – структура, состоящая из двух эвтектик $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 4 – структура, состоящая из предэвтектических карбидов VC и эвтектик $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$; 5 – структура, состоящая из избыточных карбидов VC (или карбидов $(Fe, Cr, V)_7C_3$) и эвтектик $\gamma + VC$, $\gamma + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ [10]. Изучены особенности формирования структуры и свойств чугунов всех структурных классов.

Влияние условий охлаждения на количество мартенсита q_a , аустенита q_y , комплексных карбидов хрома q_1 и ванадия q_2 в структуре чугунов первого структурного класса, %

	Сухая ПГФ				Сырая ПГФ				Кокиль			
	q_a	q_y	q_1	q_2	q_a	q_y	q_1	q_2	q_a	q_y	q_1	q_2
	67,4	3,5	27,6	1,4	48,1	8,4	40,4	2,1	19,0	31,61	51,1	3,9

Были исследованы структура сплавов и оксидных слоев, распределение элементов между структурными составляющими сплава и поверхности окисления, износстойкость, окалиностойкость и ростустойчивость жароизносостойких чугунов, легированных комплексами Cr-Mn-Ni-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Ti, Cr-Mn-Ni-Nb-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Nb-Ti [11]. Фазовый состав чугунов представляет собой α -фазу (феррит), γ -фазу (аустенит), карбиды типа M_7C_3 и карбиды типа MC. После завершения кристаллизации во всех типах форм в сплавах формируется структура, состоящая из карбидов TiC или (Nb, Ti)C, избыточных дендритов, хромистокарбидной эвтектики. В структуре чугунов, легированных Nb, присутствуют вторичных карбидов типа Cr_7C_3 (рис. 4).

Наилучшей окалиностойкостью обладает чугун ИЧ220Х18Г4Ю2Б2НТ, залитый в сырую ПГФ. В структуре чугуна количество карбидов (Nb, Ti)C 4,9% и 12,2% карбидов $(Fe, Cr, Mn)_7C_3$. Как сильный карбидообразующий элемент Nb связывает углерод в стойкие карбиды, уменьшая тем самым количество свя-

занного хрома, содержание хрома в металлической основе увеличивается, что повышает сопротивление окислению.

Максимальной износостойкостью обладает чугун ИЧ220Х18Г4Ю2Б2НТ, залитый в кокиль, в структуре присутствует 5,4% карбидов типа МС и 14% карбидов типа M_7C_3 , твердость этого чугуна максимальная – 50 HRC, микротвердость эвтектики 9369 МПа, что соответствует максимальному значению микротвердости эвтектики для всех сплавов.

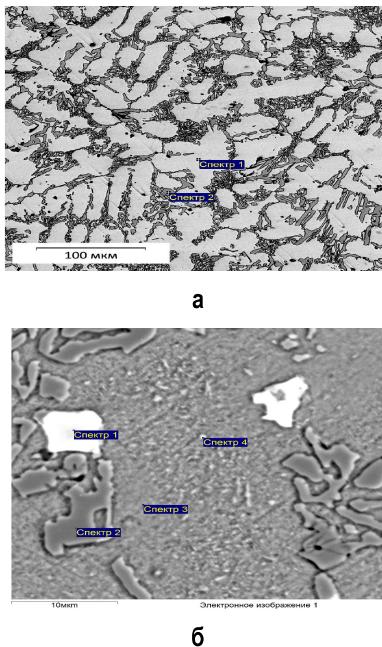


Рис. 4. Структура чугунов, легированных комплексами Cr-Mn-Ni-Ti (а) и Cr-Mn-Ni-Al-Nb-Ti (б)

Первичная литая структура чугунов сильно влияет на строение оксидных слоев. При этом обнаружи-

вается эффект наследования от первичной литой структуры чугуна строения оксидных слоев; эффект наследования состава оксидной пленки в зависимости от распределения легирующих элементов в поверхностном слое литых чугунов. С помощью рентгеновского картирования выявлены концентрационные неоднородности в различных участках оксидной пленки (рис. 5).

Выявлен эффект дисперсионного твердения сплавов в форме при совместном легировании ниобием и хромом жаростойких чугунов, что обеспечивает стабильность структуры чугунов в условиях эксплуатации при повышенных температурах. Структура чугунов состоит из карбидов (Nb, Ti)C, избыточных дендритов, эвтектики и вторичных карбидов типа M_7C_3 (рис. 4, б).

Выводы

- Установлены закономерности влияния химического состава, температурных режимов охлаждения сплавов в литейной форме на структуру металлической основы, тип карбидной фазы, морфологию, фазовый состав эвтектических композиций, механические свойства, износостойкость чугунов, легированных ванадием и комплексами V-C-Cu-Ti-B, V-Cr.

- Выявлены особенности формирования структуры сплавов, оксидных слоев, распределение элементов между структурными составляющими поверхности окисления, износостойкости, окалиностойкости и ростоустойчивости в зависимости от условий охлаждения при затвердевании жароизносостойких чугунов, легированных комплексами Cr-Mn-Ni-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Ti, Cr-Mn-Ni-Nb-Ti, Cr-Mn-Ni-Al-Nb-Ti.

- Определены составы КЛБЧ в зависимости от условий охлаждения сплава в форме, обеспечивающие максимальные механические свойства, износостойкость и жаростойкость отливок специального назначения.

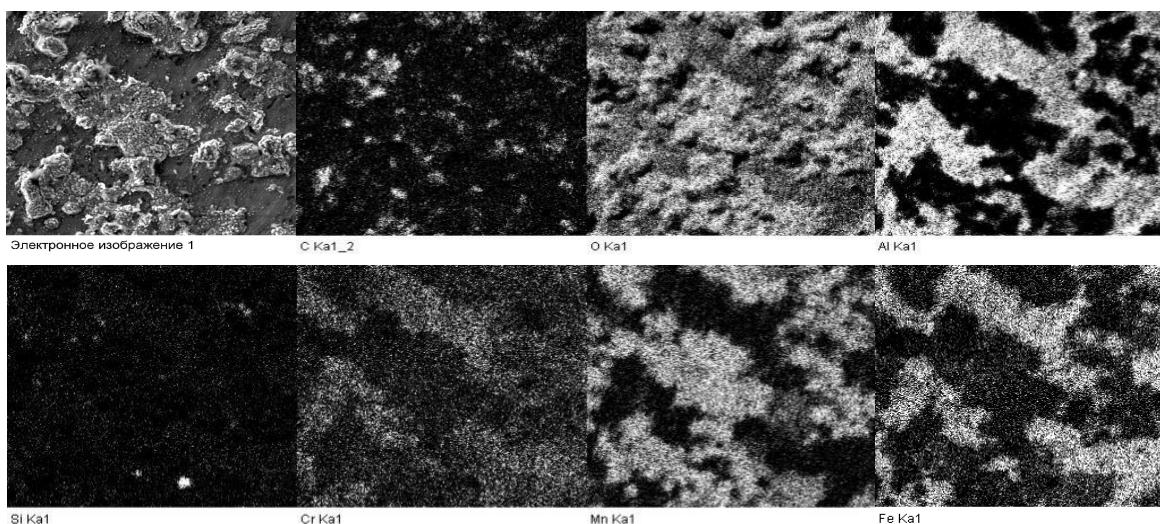


Рис. 5. Электронное изображение окисленной поверхности сплава системы Fe-C-Cr-Mn-Ni-Al-Ti и поэлементное картирование, $\times 2000$

Список литературы

1. Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С. Иносостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов. М.: Машиностроение, 1984. 104 с.
2. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. М.: Металлургия, 1976. 288 с.
3. Металловедение, физика и механика применительно к процессу обработки графитированных материалов. Структура и износстойкость инструментов: монография / Емельюшин А.Н., Мирзаев Д.А., Мирзаева Н.М., Петроченко Е.В. и др.; под общ. ред. А.Н. Емельюшина и Д.А. Мирзаева. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 200 с.
4. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях / Ри Э.Х, Ри Хосен, Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. и др. Владивосток: Дальнавуз, 2006. 275 с.
5. Сильман Г.И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях. М.: Машиностроение, 2007. 302 с.
6. Гарбер М.Е. Иносостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
7. Bedolla-Jacuinde A., Aguilar S.L. and Hernandez B. Eutectic Modification in a Low-Chromium White Cast Iron by a Mixture of Titanium, Rare Earths and Bismuth: I. Effect on Microstructure, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 14(2), 2005, pp. 149-157.
8. Neville A., Reza F., Chioveli S. and Revega T. Characterization and Corrosion Behavior of High-Chromium White Cast Irons, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37F, 2006, pp. 2339-2347.
9. Karantzalis A.E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H. and Dracopoulos V. Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron, Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, pp. 1030-1039.
10. Sain P.K., Sharma C.P. and Bhargava A.K. Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 44F, 2013, pp. 1665-1671.
11. Yoganand J., Natarajan S. and Kumaresan S.P. Babu, Erosive Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 22(9), 2013, pp. 2534-2540.
12. Петроченко Е.В. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов в литом состоянии // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. №3. С. 51-55.
13. Формирование структуры и свойств ванадиевых чугунов при их затвердевании / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Емельюшин А.Н., Потапов М.Г. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. №4. С. 41-43.
14. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structure Feature And Properties Of High-Alloy White Irons. // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5(45). pp. 3-8.
15. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочкова О.С. Влияние химического состава, условий охлаждения при затвердевании на структуру и свойства жароизносостойких комплексно-легированных железоуглеродистых сплавов // Технология металлов. 2013. №1. С. 10-14.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WHITE IRONS OF DIFFERENT ALLOYING SYSTEMS

Kolokoltsev Valeriy Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519)29-84-02. E-mail: kwm@magtu.ru.

Petrochenko Elena Vasilyevna – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: evp3738@mail.ru

Konopka Zbigniew – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of Foundry department, Czestochowa University of Technology, Poland.

Abstract. The characteristics of structure forming and properties of white irons of different alloying systems depending on the composition and cooling conditions during solidification were studied. The research group has analyzed the distinctive features of the influence of white iron chemistry and cooling temperature conditions of alloys in the mould on the metal matrix structure, carbide phase type, eutectic compositions morphology, mechanical properties, wear and heat resistance of complex alloyed white irons.

Keywords: white irons, microstructure, eutectic compositions, carbide phase, metal structure, phase composition, wear resistance, heat resistance.

References

1. Zhukov A.A., Silman G.I., Froltsov M.S. *Iznosostoykie otlivki iz kompleksno-legirovanniy belyih chugunov* [Wear resistant complex alloyed white iron castings]. Moscow: Machine building, 1984, 104 p.
2. Bobro Yu.G. *Legirovannyye chugurny*. [Alloyed cast irons]. Moscow: Metallurgy, 1976, 288 p.
3. Emelushin A.N., Mirzaev D.A., Mirzaeva N.M., Petrochenko E.V. et.al. *Metallovedenie, fizika i mehanika primenitelno k protsessu obrabotki grafitirovannykh materialov. Struktura i iznosostoykost instrumentov: monografiya* [Metal science, physics and mechanics in graphitized material processing. Tool structure and wear resistance]. Ed. A.N. Emelushin and D.A. Mirzaev. Magnitogorsk: MSTU, 2002, 200 p.
4. Ri E.H., Ri Hosen, Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. et. al. *Kompleksno-legirovannye belyie chugurny funktsionalnogo naznacheniya v litom i termoobrabotannom sostoyaniyah* [Functional complex alloyed white irons in the as-cast and heat treated states]. Vladivostok: Dalnauka, 2006, 275 p.
5. Silman G.I. *Termodynamika i termokinetika strukturoobrazovaniya v chugunah i stalyah* [Thermodynamics and thermo kinetics of structure forming in cast irons and steels]. Moscow: Machine building, 2007, 302 p.
6. Garber M.E. *Iznosostoykie belyie chugurny: svoystva, struktura, tehnologiya ekspluatatsiya* [Wear resistant white irons: properties, structure, technology, operation]. Moscow: Machine building, 2010, 280 p.

7. Bedolla-Jacuinde A., Aguilar S.L. and Hernandez B. Eutectic Modification in a Low-Chromium White Cast Iron by a Mixture of Titanium, Rare Earths and Bismuth: I. Effect on Microstructure, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 14(2), 2005, pp. 149-157.
8. Neville A., Reza F., Chioveli S., and Revega T. Characterization and Corrosion Behavior of High-Chromium White Cast Irons, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37F, 2006, pp. 2339-2347.
9. Karantzalis A.E., Lekatou A., Kapoglou A., Mavros H. and Dracopoulos V. Phase Transformations and Microstructural Observations During Subcritical Heat Treatments of a High-Chromium Cast Iron, Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, pp. 1030-1039.
10. Sain P.K., Sharma C.P., and Bhargava A.K. Microstructure Aspects of a Newly Developed, Low Cost, Corrosion-Resistant White Cast Iron, Journal Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 44F, 2013, pp. 1665-1671.
11. Yoganand J., Natarajan S. and Kumaresan S.P. Babu, Erosive Wear Behavior of Nickel-Based High Alloy White Cast Iron Under Mining Conditions Using Orthogonal Array, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 22(9), 2013, pp. 2534-2540.
12. Petrochenko E.V. Relationship between chemistry, structure and properties of complex alloyed white irons in as-cast state. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya [Proceedings of universities. Non-ferrous metallurgy]. 2012, no. 3. pp. 51-55.
13. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Emelushin A.N., Potapov M.G. Structure forming and properties of vanadium cast irons during solidification. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya [Proceedings of universities. Non-ferrous metallurgy]. 2005, no. 4, pp. 41-43.
14. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. Structure Feature And Properties Of High-Alloy White Irons. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University] 2013, no. 5 (45). pp. 3-8.
15. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkova O.S. Influence of chemistry and cooling conditions during solidification on structure and properties of heat resistant complex alloyed iron carbon alloys. Tehnologiya metallov [Process metallurgy]. 2013, no. 1, pp. 10-14.