

УДК 669.15, 54.143

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТЫХ ЧУГУННЫХ ЗАГОТОВОК ОБРАБОТКОЙ РАСПЛАВОВ КАРБОНАТАМИ ЩЗМ*

Панов А.Г.¹, д.т.н., доцент кафедры материалов, технологий и качества (alexey@modifier.ru)

Цепелев В.С.², д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики
металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии

Конашков В.В.², к.т.н., старший научный сотрудник

¹ Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета
(423810, Россия, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 68/19)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Показано, что одной из причин образования дефектов структуры центробежнолитых чугуновых заготовок, изготовленных из временных шихтовых материалов, является непредсказуемая микронеоднородность расплавов. Исследована возможность устранения указанной нестабильности с помощью обработки чугуновых расплавов рафинирующе-модифицирующими материалами типа БСК на основе карбонатов бария и стронция. Одной из главных проблем является отсутствие четких представлений о строении расплавов чугунов в термо-временных условиях литейного производства. Микронеоднородность при этом обуславливается различными структурными составляющими, унаследованными из шихтовых материалов. Кроме того, на структуру расплава и качество получаемых отливок оказывают влияние особенности операций рафинирования и модифицирования расплавов. Приведены результаты промышленных экспериментов по влиянию различных способов рафинирования и модифицирования на качество получаемых отливок. На основе полученных данных разработан оптимальный способ рафинирования и модифицирования промышленных чугунов.

Ключевые слова: отливка, чугун, расплав, структура, модифицирование, однородность, рафинирование, фазовый состав, температурно-временной режим, качество продукции.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-43-48

Как известно, чугун обладает широким диапазоном свойств в зависимости от структурного состояния имеющегося в его составе углерода. В то же время, несмотря на многочисленные исследования, до настоящего времени не разработано теории формообразования содержащих углерод фаз чугуна [1], в связи с чем остается проблема разработки технологии стабильного получения чугуновых отливок с прогнозируемыми свойствами.

Структурообразование промышленных чугунов определяется многочисленными факторами. К наиболее существенным относят термодинамическое и термокинетическое влияние химических элементов и, прежде всего, углерода – элемента с широчайшим комплексом структур и свойств [2 – 11]. Благодаря способности создавать связи sp -, sp^2 -, sp^3 -гибридизации, углерод имеет большое количество аллотропных модификаций (графит, алмаз, лонсдейлит, аморфный углерод, карбин, чаоит, фуллерены, фуллериты, нанотрубки, графены и т. д.). Об открытии большинства из этих материалов было заявлено лишь во второй поло-

вине XX в., они мало изучены, а имеющаяся информация о них неоднозначна и порой противоречива. Кроме широко известных и недавно открытых модификаций углерода, существует множество других углеродных материалов, микроструктура которых зависит от способов их приготовления. Они отличаются большим разнообразием и поэтому с трудом поддаются четкой классификации [12].

В литейном материаловедении чугуна известны также весьма многочисленные фазы как свободного углерода, так и фазы, содержащие углерод в растворенном и связанном состоянии. Наиболее подробно изучен свободный углерод в виде пластинчатого, спелевого, вермикулярного, вырожденного (чанки) и шаровидного графита, связанный – в виде феррита (α -феррит, δ -феррит, ϵ -феррит, видманштеттов феррит), мартенсита, аустенита и цементита. При этом физико-химическое состояние растворенного углерода точно неизвестно даже в железе. Принято считать, что углерод в нем преимущественно находится в атомарном состоянии, причем он может быть связан с железом псевдометаллическими связями, а при более низких температурах допускают образование углерода в полиатомарном состоянии в форме гексагональных колец.

* Работа выполнена при финансовой поддержке. Постановление № 211 Правительства РФ, контракт № 02.А03.21.0006.

Работа поддержана в рамках научных исследований высших учебных заведений РФ по государственному заданию № 2014/236.

Установлено [13], что полиморфные превращения в железе (при 911 °С – переход из неплотной ОЦК α -модификации в плотную кубическую γ -фазу; при 1392 °С – переход из плотной кубической γ -фазы в ОЦК δ -фазу; при 1538 °С – переход в плотную ϵ -модификацию; при 1700 °С – переход к статистически плотной упаковке шаров с понижением плотности при повышении температуры перегрева) приводят к изменению внешней электронной конфигурации свободных атомов железа ($3d^6 4s^2$). При полиморфных превращениях дискретный $4s^2$ -уровень расщепляется в широкую энергетическую полосу, а α -орбитали меняют свою протяженность и, как следствие, химическую активность, что может приводить к образованию различных соединений с углеродом в расплаве.

Одной из главных составляющих указанной проблемы является отсутствие четких представлений о строении расплавов чугунов в термо-временных условиях литейного производства. Анализ эволюции моделей, описывающих строение чугуновых расплавов (табл. 1), показывает, что за последние полвека у специалистов появилась определенность лишь в том, что чугуновые расплавы микронеоднородны. Микронеоднородность при этом обуславливается различными структурными составляющими, унаследованными из

шихтовых материалов. Природа большинства описываемых структур носит дискуссионный характер и инструментально не определена. Из производственной практики известно, что, помимо указанных в таблице, промышленные чугуновые расплавы содержат различные случайные или специальные неметаллические включения, а также физико-химические связи поверхностно-активных элементов, таких как кислород и сера [14].

До сих пор остаются дискуссионными вопросы, что является графитным зародышем и как происходит рост графита различной формы, поскольку они экспериментально точно не установлены. На уровне гипотез зародышами графита в расплаве рассматриваются: пластинки, составленные из базисных слоев (плоских макромолекул), фуллериты, карбиды, различные неметаллические включения и газовые пузырьки. В зависимости от состояния расплава и условий его охлаждения рост зародыша приводит к образованию графитных включений разной формы.

В последние десятилетия в практике отечественного литейного производства резко изменились структура шихты и качество ее отдельных составляющих, а именно – резко увеличилась степень синтетичности за счет внедрения электропечной плавки, увеличения доли от-

Таблица 1

Эволюция моделей, описывающих строение чугуновых расплавов [1]

Table 1. Evolution of the models, describing the structure of cast-iron melts)

Годы	Структурные элементы расплавов	Авторы
1960-е, 1970-е	Истинный раствор Fe – C (углерод и железо в атомарном состоянии)	Богачев И.Н., Бунин К.П. и др.
1972	Зародыш графита представляет собой пластинку, составленную из базисных слоев (плоских макромолекул)	Бунин К.П.
1960-е, 1970-е	Коллоид, в котором содержатся микрочастицы кристаллического графита, жидкости ОЦК и ГЦК	Иванов Д.П., Вертман А.А., Самарин А.М.
1979	Углерод в свободном виде, в растворе Fe ОЦК и ГЦК, а также в виде Fe_3C с постепенным разрушением связей при нагреве	Шумихин В.С.
1988	Электростатический разряд (ЭСР) с ближним порядком по типу цементита Fe_3C	Романова А.В.
1960-е, 1970-е, 2002	Субмикрорегетерогенный расплав на основе углеродных комплексов, образующихся в результате поэтапной полимеризации углерода в бесконечные иерархические структуры	Жуков А.А., Давыдов С.В.
2007	Наличие в расплаве δ -фазы, γ -фазы, L_δ , L_γ	Кимстач Г.М.
2007	Субмикрорегетерогенный расплав с ЭСР типа Fe_3C	Барышев Е.Е.
2007	Три эвтектических расплава (L_{II} , L_I и L_g), один монотектический ($L_{MI}(Fe_3C)$) и один, получающийся при нагреве перестроением L_g -расплава в L_g , перестраивающийся, в свою очередь, при дальнейшем нагреве в статистическую (атомарную) жидкость	Белов Б.Н.
1980-е, 2010-е	Двухфазная дисперсная система из 2 %-го раствора углерода в γ -Fe и цементита. Свободный графит неустойчив	Залкин В.М.
2012	Нестабильная аустенитно-цементитная и аустенитно-графитная дисперсные системы с большим временем живучести	Макаренко К.В.

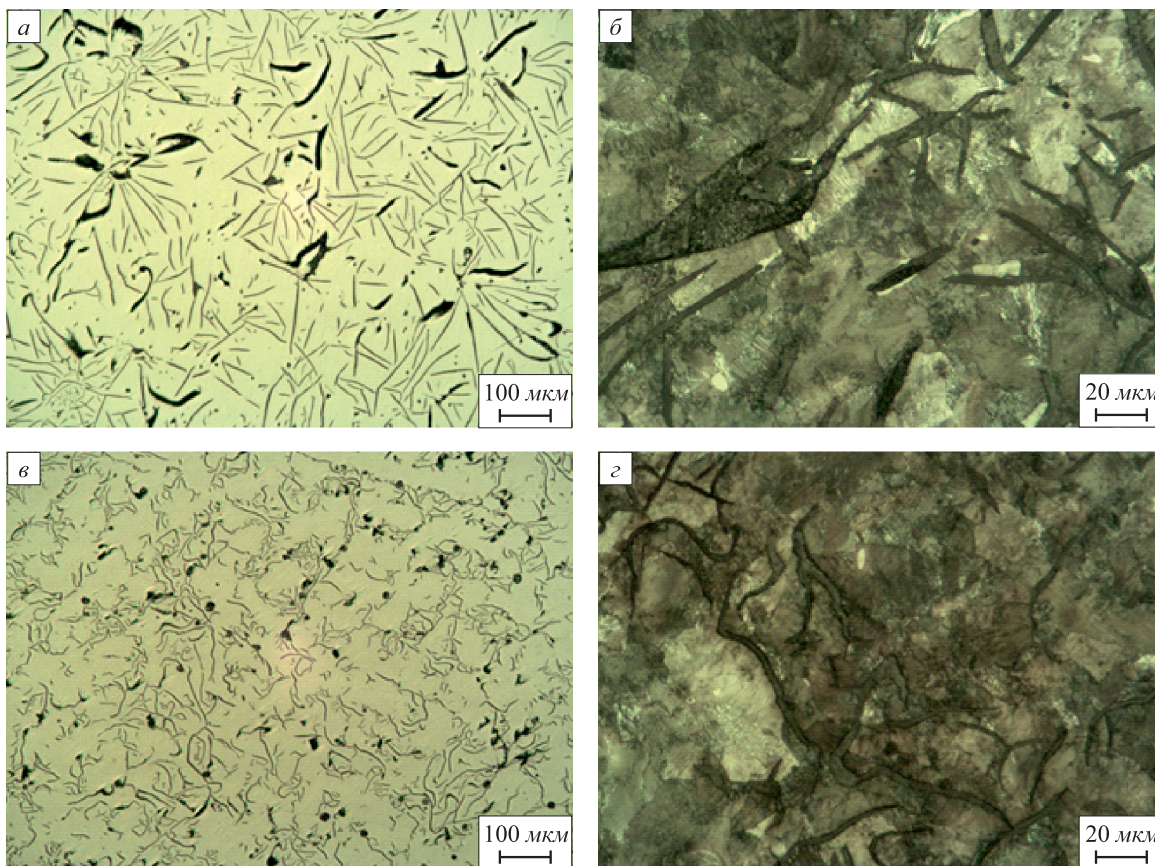
носителем дешевых стального лома и науглероживателей, содержащих нерегламентированные примеси [14]. Все это сказалось на усложнении и непредсказуемости строения расплавов в термовременных условиях чугунолитейного производства, что сопровождается ростом дефектности структуры отливок, увеличением доли возврата собственного производства с «плохой наследственностью» и, как следствие, снижением эффективности производства.

Одним из решений указанной проблемы является активно развивающаяся обработка чугунных расплавов рафинирующе-модифицирующими материалами на основе барий-стронциевых карбонатов [15–17]. Новую технологическую операцию в настоящее время уже постоянно применяют литейные производства автомобилестроения (КАМАЗ, АВТОВАЗ, УАЗ и др.) при изготовлении отливок в песчано-глинистые формы. Исследовано влияние обработки чугунных расплавов карбонатами ЩЗМ (модификатор Р-20) при изготовлении отливок «гильза» в металлические формы центробежным способом. Для этого проанализированы макро- и микроструктуры поперечного сечения брусков, продольно вырезанных из отливок, полученных без обработки (стандартный вариант) и с обработкой модифи-

катором Р20 (опытный вариант) с модифицированием ФС65Ba4 в обоих вариантах.

Визуальный осмотр образцов показал, что они отличаются по качеству внутренней поверхности. Опытные отливки имели наиболее гладкую и ровную поверхность, что соответствует наибольшей жидкотекучести расплава. Отливки стандартной технологии имели шероховатую поверхность, требующую больший припуск на механическую обработку примерно на 0,5...1 мм (~5 % металлоемкости отливки). Характерные микроструктуры чугунов представлены на рисунке, результаты исследования микроструктуры и механических свойств – в табл. 2.

Микроструктура чугуна стандартного варианта – равномерно распределенный с небольшим количеством колоний пластинчатый графит, преимущественно прямолинейный с длиной включений 45 – 90 мкм, у внутреннего рабочего края – до 200 мкм, в количестве 12 %. Металлическая основа: перлит пластинчатый в количестве 96 – 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм и фосфидная эвтектика в виде отдельных включений площадью не более 2000. По обоим краям на глубину 1,0 – 1,2 мм присутствует феррит ~ до 8 %.



Микроструктура отливок «гильза» из экспериментальных чугунов:
а, б – стандартных, в, з – опытных; а, в – $\times 100$, не травлено, б, з – $\times 500$, травлено

Microstructure of castings like “sleeve” from experimental cast-iron:
а, б – standard, в, з – tested; а, в – $\times 100$, не травлено, б, з – $\times 500$, травлено

Таблица 2

Микроструктура и механические свойства экспериментальных чугунов

Table 2. Microstructure and mechanical properties of experimental cast-iron

Вариант	Графит	Матрица	σ_b	НВ
Стандарт	ПГф1(2) ПГр1,3 ПГд45-90 по рабочему краю 180- 200 ПГ12 максимальное количество выкрашивающегося графита	Пт1 П98(Ф2) Пд0,3 ФЭр1 ФЭп2000	232	207
Опытный	ПГф1,2 ПГр1,3(9) ПГд45-90 по рабочему краю 180 ПГ10-12 количество выкрашивающегося графита незначительное	Пт1 П(Ф0) Пд0,3 ФЭр1 ФЭп2000	245 – 260	217 – 241

Микроструктура чугуна опытного варианта – так же равномерно распределенный с небольшим количеством колоний пластинчатый графит практически полностью прямолинейный с увеличением доли завихренного и длиной включений 45 – 90 мкм, у внутреннего рабочего края до 180 мкм и в количестве 10 – 12 %. Крупного прямолинейного графита значительно меньше, чем в стандартном чугуне. Металлическая основа: 100 % перлит пластинчатый с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм и фосфидная эвтектика в виде отдельных включений площадью не более 2000. По обоим краям так же присутствует феррит ~ до 8 %, но на меньшую глубину (0,7 – 0,8 мм).

Таким образом, обработка рафинирующе-модифицирующим материалом Р20 приводит к улучшению качества внутренней поверхности отливок (позволяет уменьшить припуски на механическую обработку), значительному увеличению стабильности аустенита и, как следствие, увеличению доли перлита, увеличению твердости, увеличению прочности, уменьшению обезуглероживания матрицы (уменьшает долю феррита) на поверхности отливки. Обработка Р20 приводит также к некоторому завихрению графита, уменьшению его доли и снижению количества крупного выкрашивающегося графита.

На основании результатов экспериментальных работ было принято решение о проведении недельных промышленных испытаний. Начиная с третьего дня испытаний в шихте использовался возврат собственного производства, прошедший обработку модификатором Р20. Во время испытаний выявлено постепенное полное исчезновение в микроструктуре матрицы феррита, значительное уменьшение выкрашивающегося графита, увеличение уровня и стабильности прочности и твердости чугуна. Динамика изменения механических свойств отливок чугуна представлена в таб. 3.

Выводы. Анализ современных представлений о строении чугунных расплавов и производственной практики показывает, что в термовременных условиях литейного производства расплавы микрогетерогенны, имеют разнообразные изменчивые структурные составляющие, строение которых в настоящее время точно не определено и зависит от исходной структуры шихтовых материалов. Для стабилизации структуры и свойств

отливок в таких условиях применяется обработка расплава рафинирующе-модифицирующими материалами типа БСК (Р20) на основе карбонатов щелочноземельных металлов.

Исследование влияния такой обработки на качество центробежнолитых чугунных заготовок показало, что она приводит к повышению общей однородности структуры, стабилизации аустенита (измельчению продуктов распада аустенита, подавлению ферритообразования в теле отливки и уменьшению глубины обезуглероженного слоя на поверхности отливки), повышению прочности и твердости серого чугуна без увеличения склонности к отбелу.

Выявленные эффекты достигаются без изменения химического состава чугуна на основании результатов визуального наблюдения процесса обработки в соответствии с квазихимической моделью микронеоднородного строения расплавов, а также явлением структурной наследственности сплавов и объясняются [14]:

- перемешиванием расплава за счет движения газов, повышающим макрооднородность расплава;
- рафинирующим действием оксидов Ва и Sr;
- дегазирующим действием пузырьков $\{CO_2 + CO\}$;
- зародышеобразующим действием оксидов Ва и Sr и продуктов их взаимодействия с неметаллическими включениями в локально переохлажденных микрообъемах расплава за счет диссоциации карбонатов и расширения микропузырьков $\{CO_2 + CO\}$;
- разрушающим механическим воздействием микропузырьков $\{CO_2 + CO\}$, имеющих размеры

Таблица 3

Динамика механических свойств чугуна в промышленных испытаниях

Table 3. Change of mechanical properties of cast iron at industrial tests

Показатель	Порядковый день опытной недели					
	1	2	3	4	5	6
σ_b	251	248	245	245	256	267
НВ	235	241	248	248	248	248

порядка десятков и сотен микрон, на элементы структуры расплава, за счет чего повышается его микрооднородность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панов А.Г. О строении чугуновых расплавов // *Металлургия машиностроения*. 2014. № 5. С. 6 – 12.
2. Давыдов С.В. Влияние термокинетических факторов на структурообразование в графитизированных чугунах: Дисс. ... докт. тех. наук. – Брянск: БГТУ, 2002. – 376 с.
3. Шешуков О.Ю., Вязникова Е.А., Смирнова В.Г. Влияние структуры модификатора на механические свойства чугуна // *Расплавы*. 2012. № 3. С. 68 – 72.
4. Шешуков О.Ю., Вязникова Е.А., Смирнова В.Г. О влиянии структуры модификатора на механические свойства чугуна // *Тр. XIII Рос. конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов. Взаимосвязь структуры и свойств кристаллического, нанокристаллического и неупорядоченного состояний»*. – Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2011. Т. 4. С. 90 – 93.
5. Кульбовский И.К., Поддубный А.Н., Богданов Р.А., Булдин С.В. Влияние химического состава на свойства и структуру высокопрочного чугуна // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2007. № 5. С. 11 – 13.
6. Мельников В.П. Влияние переохлаждения расплава при затвердевании на структуру чугуна крупных цилиндрических отливок // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2006. № 1. С. 4 – 6.
7. Сильман Г.И., Камынин В.В., Харитоненко С.А. Влияние кремния на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 6. С. 38 – 41.
8. Попов П.И., Сизов И.Г. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства чугуна с вермикулярным графитом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 6. С. 41 – 43.
9. Рожкова Е.В., Орехова А.И., Белов В.Д., Базлова Т.А. Управление первичной структурой хромистого чугуна // *Черные металлы*. 2010. № 1. С. 9 – 12.
10. Афонаскин А.В. Исследование влияния комплексного модифицирования чугуна на структуру, механические свойства и обрабатываемость кокильных отливок после графитизирующего отжига // *Литейщик России*. 2010. № 3. С. 42 – 44.
11. Сильман Г.И., Камынин В.В., Гончаров В.В. Влияние меди на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. № 6. С. 43 – 48.
12. Хайманн Р.Б., Евсюков С.Е. Аллотропия углерода // *Природа*. 2003. № 8. С. 66.
13. Григорович В.К. Новые данные о диаграмме железо–углерод и влиянии легирующих элементов на графито- и карбидообразование в чугунах // *Литейные свойства сплавов: Сб. тр.* – Киев: Наукова думка, 1968. Ч. 1. С. 78–80.
14. Панов А.Г., Бейлис Л.М., Аникеев В.В., Никитин В.И. Стабильное модифицирование высокопрочных чугунов. Метод, модификаторы, технологии // *LAP LAMBERT Academic Publishing*. – Saarbrücken, Deutschland, 2013. – 342 с.
15. Панов А.Г. Управление кристаллизацией чугуна ваграночной плавки при изготовлении отливок изложниц // *Литейщик России*. 2011. № 6. С. 25 – 27.
16. Панов А.Г., Гуртовой Д.А. Практика обработки карбонатами ЦЗМ расплавов дуговой плавки при изготовлении отливок из высокопрочного чугуна // *Литейщик России*. 2012. № 8. С. 25 – 27.
17. Кулахметов А.Н., Кузнецов А.А., Иванов С.В. и др. Опыт применения рафинирующе-модифицирующих материалов БСК-2-УС и Р20 в условиях чугунолитейного производства ОАО «АВТОВАЗ» // *Литейщик России*. 2014. № 11. С. 41 – 44.

Поступила 30 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 1, pp. 43–48.

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF QUALITY IMPROVEMENT OF CENTRIFUGAL CASTING BILLETS MADE FROM CAST-IRON BY PROCESSING OF MELTS BY ALKALINE EARTH METALS CARBONATES

A.G. Panov¹, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Materials, Technology and Quality

(alexey@modifier.ru)

V.S. Tsepelev², Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Research Center of Physics of Metallic Liquids of the Institute of Materials and Metallurgy

V.V. Konashkov², Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

¹Naberezhnye Chelny branch of the federal “Kazan (Volga) Federal University” (68/19 Mira ave., Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, 423810, Russia)

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The authors have shown that the unpredictable micro heterogeneity of cast iron melts is a reason for structural defect of the billets, manufactured by centrifugal casting. The possibility of eliminating of this reason by treatment of BSC-type materials, based on alkaline earth metal carbonates was investigated. One of the main problems is lack of clear ideas of a structure of fusions of cast-iron in thermo-time conditions of foundry production. Microinhomogeneity thus is caused by various structural components inherited

from the burdening of materials. Besides, features of operations of refinement and modifying of fusions have impact on structure of fusion and quality of produced castings. Results of industrial experiments on influence of various ways of refinement and modifying on quality of produced castings are given. On the basis of the obtained data the optimum way of refinement and modifying of industrial cast iron was developed.

Keywords: casting, cast iron, melt, structure, modifying, homogeneity, refinement, phase structure, thermo-time regime, product quality.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-43-48

REFERENCES

1. Panov A.G. The structure of cast iron melts. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2014, no. 5, pp. 6–12. (In Russ.).
2. Davydov S.V. *Vliyaniye termokineticheskikh faktorov na strukturoobrazovanie v grafitizirovannykh chugunakh: diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Influence of thermo-kinetic factors on the structure formation in graphitic cast irons: Dr. Tech. Sci. Diss.]. Bryansk: BGTU. 2002. 376 p. (In Russ.).
3. Sheshukov O.Yu., Vyaznikova E.A., Smirnova V.G. Effect of modifier structure on the mechanical properties of cast iron. *Raspavy*. 2012, no. 3, pp. 68–72. (In Russ.).

4. Sheshukov O.Yu., Vyaznikova E.A., Smirnova V.G. Effect of the modifier structure on mechanical properties of cast iron. In: *Stroenie i svoystva metallicheskih i shlakovykh rasplavov. Vzaimosvyaz' struktury i svoystv kristallicheskogo, nanokristallicheskogo i neuporyadochennogo sostoyanii: Tr. XIII Ros. konf.* [Structure and properties of metallic and slag melts. Connection of the structure and properties of crystalline, nanocrystalline and disordered states: Proc. Of the XIII Russian Conf.]. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr akademicheskogo obsluzhivaniya, 2011, vol.4, pp. 90–93. (In Russ.).
 5. Kul'bovskii I.K., Poddubnyi A.N., Bogdanov R.A., Buldin S.V. Effect of chemical composition on the properties and structure of high-strength cast iron. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2007, no. 5, pp. 11–13. (In Russ.).
 6. Mel'nikov V.P. Effect of hypothermia during the solidification of the melt on the structure of cast iron of the large cylinder castings. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006, no. 1, pp. 4–6. (In Russ.).
 7. Sil'man G.I., Kamynin V.V., Kharitonov S.A. Effect of silicon on the structure and properties of high-strength spherulitic iron. *Metal Science and Heat Treatment*. 2006, vol. 48, no. 5–6, pp. 268–271.
 8. Popov P.I., Sizov I.G. Effect of alloying elements on the structure and properties of iron with vermicular graphite. *Metal Science and Heat Treatment*. 2006, vol. 48, no. 5–6, pp. 272–275.
 9. Rozhkova E.V., Orekhova A.I., Belov V.D., Bazlova T.A. Control of the primary structure of chromium cast iron. *Chernye metally*. 2010, no. 1, pp. 9–12. (In Russ.).
 10. Afonaskin A.V. The investigation of the effect of complex modification on cast iron structure, mechanical properties and machinability of die castings after graphitizing annealing. *Liteishchik Rossii*. 2010, no. 3, pp. 42–44. (In Russ.).
 11. Sil'man G.I., Kamynin V.V., Goncharov V.V. Effect of copper on the structure and properties of high-strength cast iron with nodular graphite. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2010, no. 6, pp. 43–48. (In Russ.).
 12. Khaimann R.B., Evsyukov S.E. Carbon allotropes. *Priroda*. 2003, no. 8, p. 66. (In Russ.).
 13. Grigorovich V.K. New data on the iron-carbon diagram and the influence of alloying elements on the formation of carbide and graphite in cast iron. In: *Liteinye svoystva splavov: sb. tr.* [Casting properties of alloys: Coll. of sci. papers]. Kiev. Naukova dumka. 1968. Part. 1, pp. 78–80. (In Russ.).
 14. Panov A.G., Beilis L.M., Anikeev V.V., Nikitin V.I. *Stabil'noe modifitsirovanie vysokoprochnykh chugunov. Metod, modifikatory, tekhnologii* [Stable modifying of high-strength cast iron. Method, modifiers, technologies]. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland, 2013. 342 p. (In Russ.).
 15. Panov A.G. Control of crystallization of iron of cupola melting at manufacture of casting molds. *Liteishchik Rossii*. 2011, no. 6, pp. 25–27. (In Russ.).
 16. Panov A.G., Gurtovoi D.A. The practice of treatment of arc melting melts by alkali earth metal carbonates at manufacture of castings of high-strength cast iron. *Liteishchik Rossii*. 2012, no. 8, pp. 25–27. (In Russ.).
 17. Kulakhmetov A.N., Kuznetsov A.A., Ivanov S.V. etc. Experience of refining-modifying materials BSK-2 and CS-P20 at cast-iron production of OJSC "AVTOVAZ". *Liteishchik Rossii*. 2014, no. 11, pp. 41–44. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the Resolution no. 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.0006.
The work was supported as a research of universities of the Russian Federation on the state task no. 2014/236.

Received December 30, 2014