

**В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. А. Зеленая, Д. Н. Берчук, С. Н. Медведь**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ МАРГАНЦА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ**

*Получены количественные закономерности, характеризующие влияние содержания марганца в зависимости от толщины стенки отливки на структурообразование и механические свойства высокопрочного чугуна, модифицированного в литейной форме. Показано, что в результате внутриформенного модифицирования карбидообразующее действие марганца в высокопрочном чугуне значительно ослабляется, что позволяет получать тонкостенные отливки без отбела с высокой степенью перлитизации металлической основы и повышенными показателями прочности.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, внутриформенное модифицирование, марганец, толщина отливки, структура, механические свойства.

*Отримано кількісні закономірності, що характеризують вплив вмісту марганцю в залежності від товщини стінки виливка на структуроутворення і механічні властивості високоміцного чавуну, модифікованого в ливарній формі. Показано, що в результаті внутрішньоформового модифікування карбидоутворююча дія марганцю у високоміцному чавуні значно послаблюється, що дозволяє отримувати тонкостінні виливки без відбілу з високим ступенем перлітизації металевої основи і підвищеними показниками міцності.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, внутрішньоформове модифікування, марганець, товщина виливка, структура, механічні властивості.

*Quantitative regularities characterizing the influence of manganese content depending on casting wall thickness on the structure formation and mechanical properties of ductile cast iron modified in foundry mould are obtained. It is shown that at in-mould modifying carbide forming action manganese in ductile cast iron is considerably weakened that allows to produce without chilling thin-walled castings with a high degree of metal base perlitization and higher rates of strength.*

**Keywords:** ductile cast iron, in-mould modifying, manganese, casting thickness, structure, mechanical properties.

**П**рогресс в машиностроении способствует производству из высокопрочного чугуна тонкостенных отливок, которые могут успешно конкурировать с отливками из алюминиевых сплавов. Исследования удельной (отнесенной к массе сплава) прочности и долговременной прочности литейных алюминиевых сплавов и чугуна с шаровидным графитом подтвердили техническую перспективность и экономическую целесообразность применения тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна взамен алюминиевых [1].

Развитие научных основ процесса получения из высокопрочного чугуна тонкостенных отливок без структурно свободного цементита с повышенным уровнем механических свойств и создание на их основе материало- и энергосберегающих технологий является актуальной проблемой современного литейного производства. Решение задачи получения из высокопрочного чугуна отливок с толщиной стенок 2-3 мм обеспечит снижение массы деталей и повышение технико-экономических показателей современных машин и оборудования.

Наряду с модифицированием, к главным факторам, определяющим степень графитизации структуры и свойства отливок, также относятся химический состав высокопрочного чугуна и скорость охлаждения. Изменяя содержание марганца в высокопрочном чугуне, можно регулировать соотношение перлит/феррит в металлической основе и уровень прочностных свойств отливок. Марганец, снижая активность углерода в расплаве, уменьшает количество образующихся включений шаровидного графита, тормозит графитизацию и способствует отбелу тонкостенных отливок. С повышением содержания марганца увеличивается количество перлита, повышаются прочность и твердость, снижается пластичность высокопрочного чугуна.

Марганец повышает устойчивость цементита в составе перлита, затрудняя его распад при отжиге отливок. С целью увеличения количества перлита в металлической основе, прочности и твердости высокопрочного чугуна содержание марганца в нем повышают до уровня 0,7-0,9 %. Для большей износостойкости содержание марганца в высокопрочном чугуне может быть увеличено до 1,0-1,4 % [2]. Карбидообразующая способность марганца значительно ослабляется при повышении в чугуне содержания кремния до 3 % и в результате применения графитизирующего модифицирования [3].

Марганец снижает порог хладноломкости, поэтому в деталях, испытывающих ударные нагрузки и работающих при отрицательных температурах, его содержание должно быть минимальным. В высокопрочных чугунах ферритного класса рекомендуется содержание марганца менее 0,3 % [4].

Применение марганца для повышения степени перлитизации металлической основы высокопрочного чугуна значительно дешевле по сравнению с другими известными перлитизирующими элементами – медью, никелем, оловом. Однако в отличие от последних марганец является карбидообразующим элементом и для получения тонкостенных отливок без отбела необходимо повысить степень графитизации структуры, что позволяет применение высокоэффективного внутриформенного модифицирования. Учитывая вышеизложенное, очевидна актуальность исследования влияния содержания марганца в зависимости от условий охлаждения на структуру и механические свойства высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием.

*Целью работы* являлось исследование влияния содержания марганца в зависимости от условий охлаждения на структурообразование и механические свойства отливок из модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна.

Лабораторные плавки проводили в индукционной электропечи емкостью 10 кг. В качестве шихты использовали переплав чушкового передельного чугуна марки ПЛ2 (50 %) и возврата высокопрочного чугуна (50 %). Химический состав полученного шихтового чугуна следующий (%мас.): 4,12 С; 0,95 Si; 0,35 Mn; до 0,1 Cr; до 0,1 Cu; 0,026 S; 0,055 P. Для получения планируемого содержания марганца в конце плавки в индукционную печь вводили расчетное количество ферромарганца ФМн75.

Модифицирование магниевой лигатурой проводили в специальной форме с литниково-модифицирующей системой, состоящей из стояка, проточного реактора и шлакоуловителя, соединенных литниковыми каналами. Модифицированный расплав через сливной канал поступал в стояк нижерасположенной формы для получения технологической ступенчатой пробы [5]. Заливку форм проводили при температуре чугуна 1440-1450 °С. Температуру жидкого чугуна перед выпуском из печи и в ковше перед заливкой контролировали термодпарой погружения. Модифицирование осуществлялось в проточном реакторе магниевой лигатурой ФСМг-7, расход которой составлял 1,2 % от массы заливаемого расплава. Содержание кремния в металле отливок находилось в пределах 2,6-2,9 %мас.

Влияние содержания марганца на структуру высокопрочного чугуна изучали на шлифах, вырезанных из технологической пробы со ступенями размером 60x60 мм и толщиной сечений на модели 1,5; 2,5; 5; 10; 15 мм. Расположение ступеней в форме обеспечивало последовательное заполнение их расплавом, начиная с

наиболее удаленной от стояка ступени толщиной 1,5 мм. Металлографический анализ проводили в поперечных сечениях ступеней от их центра до боковой наружной поверхности.

Толщину отлитых ступеней варьировали в определенных пределах, обусловленных литейными уклонами, расталкиванием формы при извлечении модели, деформацией формы под действием давления, обусловленного затвердеванием и охлаждением отливки. С учетом этого, перед проведением металлографического анализа измеряли фактическую толщину шлифа в месте, подготовленном для исследования. Функциональные графики, описывающие полученные закономерности, строили по данным металлографического анализа структуры в центре ступеней.

Для исследования влияния марганца на механические свойства модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна отливали стандартные клиновидные пробы толщиной у основания 25 мм, массой 7 кг (ДСТУ 3925-99).

Влияние содержания марганца в пределах 0,35-1,30 % на параметры структуры ступеней технологической- пробы в зависимости от их толщины представлены в таблице и на рис. 1, 2. В условиях проведенного исследования при содержании 0,35-0,7 % Mn получили все ступени без цементита. При содержании 1,0 % Mn количество цементита в середине ступени толщиной 2 мм составляло 8 %, а у края достигало 20 %. При содержании 1,3 % Mn в структуре ступени толщиной 2 мм по всей площади шлифа от середины до края количество цементита составляло 20 %. В структуре более толстых ступеней цементит не наблюдался. Таким образом, при высоком для высокопрочного чугуна содержании марганца (1,0-1,3 %) цементит образуется только в тонких сечениях толщиной 2 мм, что в условиях внутрiformенного модифицирования открывает возможность применения шихтовых материалов с повышенным содержанием марганца для получения мелкого литья без отбела.

### Влияние марганца на количество цементита в микроструктуре ступеней толщиной 2 мм

Содержание Mn, %	Место на шлифе	Количество цементита, %
1,0	середина ступени	8
	край ступени	15
1,3	середина ступени	20
	край ступени	20

С повышением содержания марганца от 0,35 до 1,30 % мас. количество включений шаровидного графита в структуре ступенчатой пробы уменьшается на ~30 %, а количество перлита в металлической основе повышается в 2,5-4,0 раза (рис. 1).

Влияние марганца на механические свойства модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна определяли на образцах, изготовленных из стандартных клиновидных проб толщиной 25 мм. Параллельно проводили количественный металлографический анализ структуры клиновидных проб.

Исходный чугун выплавляли в индукционной электропечи ИСТ-016 на шихте, состоящей из 85 % передельного чушкового чугуна марки ПЛ2, 10 % отходов электротехнической (динамной) стали и 5 % ферросилиция ФС45. В передельном чугуне содержание серы составляло 0,020-0,027 % мас., в динамной стали – 0,012-0,014 % мас. После расплавления шихты среднее содержание химических элементов составило (% мас.): 3,51 C; 2,10 Si; 0,40 Mn; 0,18 Ni; 0,088 Cu; 0,02 S; 0,045 P. Для получения планируемого содержания марганца в расплав чугуна вводили расчетное количество ферромарганца марки ФМн75. Модифицирование проводили в расположенном в литейной форме центробежном проточном реакторе магниевой лигатурой ФСМг7

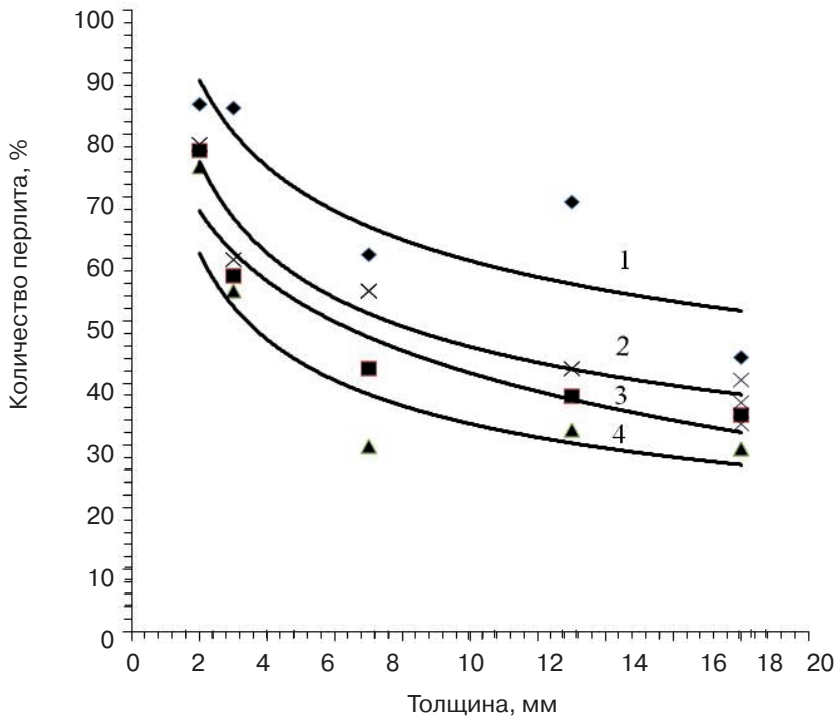
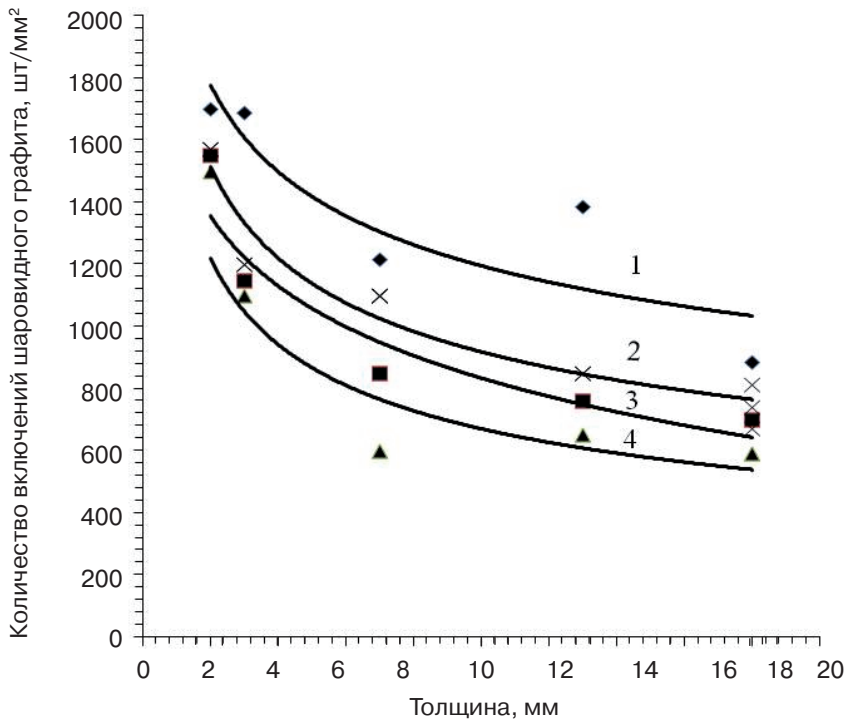


Рис. 1. Влияние содержания марганца и толщины сечения ступени на микроструктуру высокопрочного чугуна: 1 – 0,35; 2 – 0,7; 3 – 1,0; 4 – 1,3 %



Толщина, мм

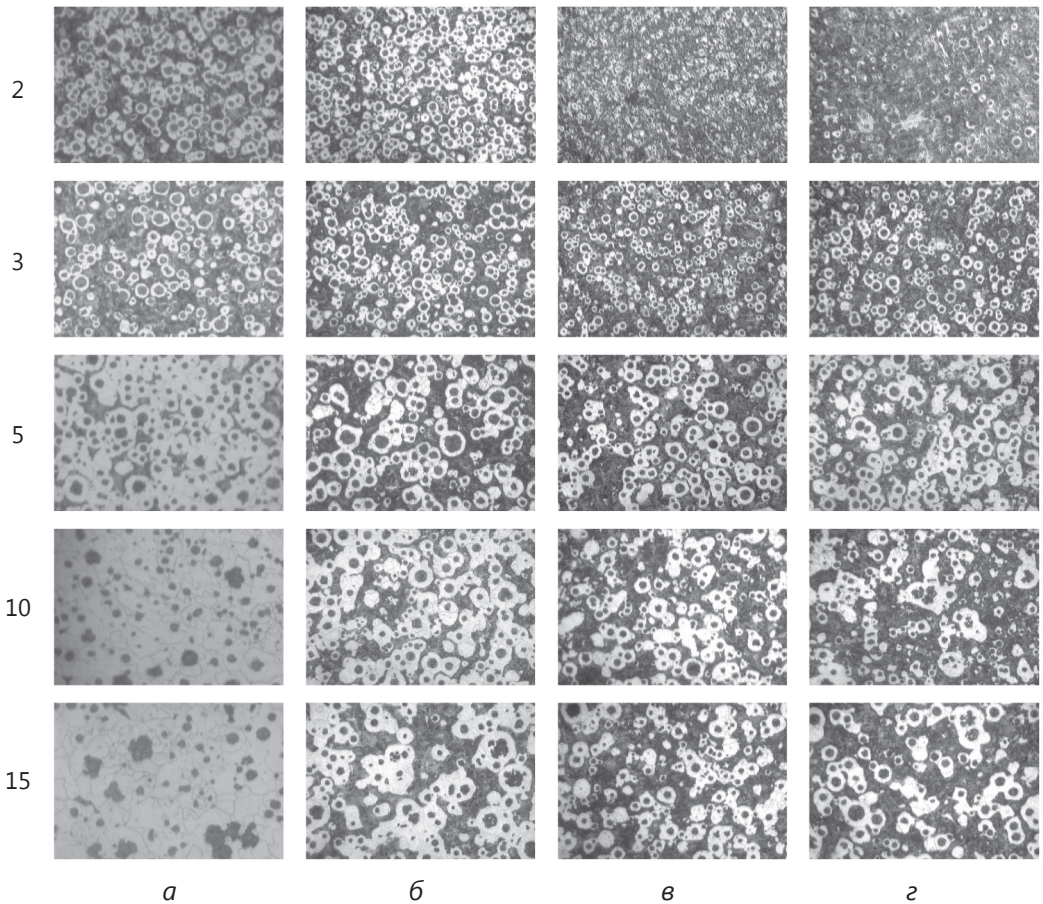


Рис. 2. Влияние марганца на микроструктуру высокопрочного чугуна в зависимости от толщины сечения ступени, в %: а – 0,35; б – 0,7; в – 1,0, г – 1,3,  $\times 100$

в количестве 1 % от массы заливаемого в литейную форму чугуна. Содержание кремния в металле клиновидных проб находилось в пределах 2,70-2,95 %мас.

В исследованном диапазоне содержания марганца 0,4-1,8 % (рис. 3) цементит при кристаллизации в структуре клиновидных проб не образовывался. Исходный высокопрочный чугун с содержанием 0,4 % Mn и металлической основой из 85-95 % феррита имел предел прочности при растяжении ( $\sigma_b$ ) 500 МПа, предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) – 370 МПа, твердость (НВ) – 1620 МПа и высокие показатели относительного удлинения ( $\delta$ ) 17 % и ударной вязкости (КС) 90 Дж/см<sup>2</sup>. С повышением содержания марганца увеличивается количество перлита в металлической основе, повышаются прочность и твердость, снижаются относительное удлинение и ударная вязкость. Благоприятное сочетание прочности и пластичности достигается при содержании 1,0-1,3 % Mn:  $\sigma_b = 550-580$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 400-440$  МПа;  $\delta = 6-10$  %. При дальнейшем повышении содержания марганца до 1,8 % значительно повышаются прочностные показатели:  $\sigma_b = 650$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 520$  МПа, но относительное удлинение снижается до 2-3 %, а ударная вязкость – до 10-15 Дж/см<sup>2</sup>.

Экспериментально изучено влияние термической обработки на механические свойства модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна в зависимости от содержания в нем марганца. Проведен графитизирующий отжиг клиновидных проб по следующему режиму: нагрев в печи до 880 °С, выдержка

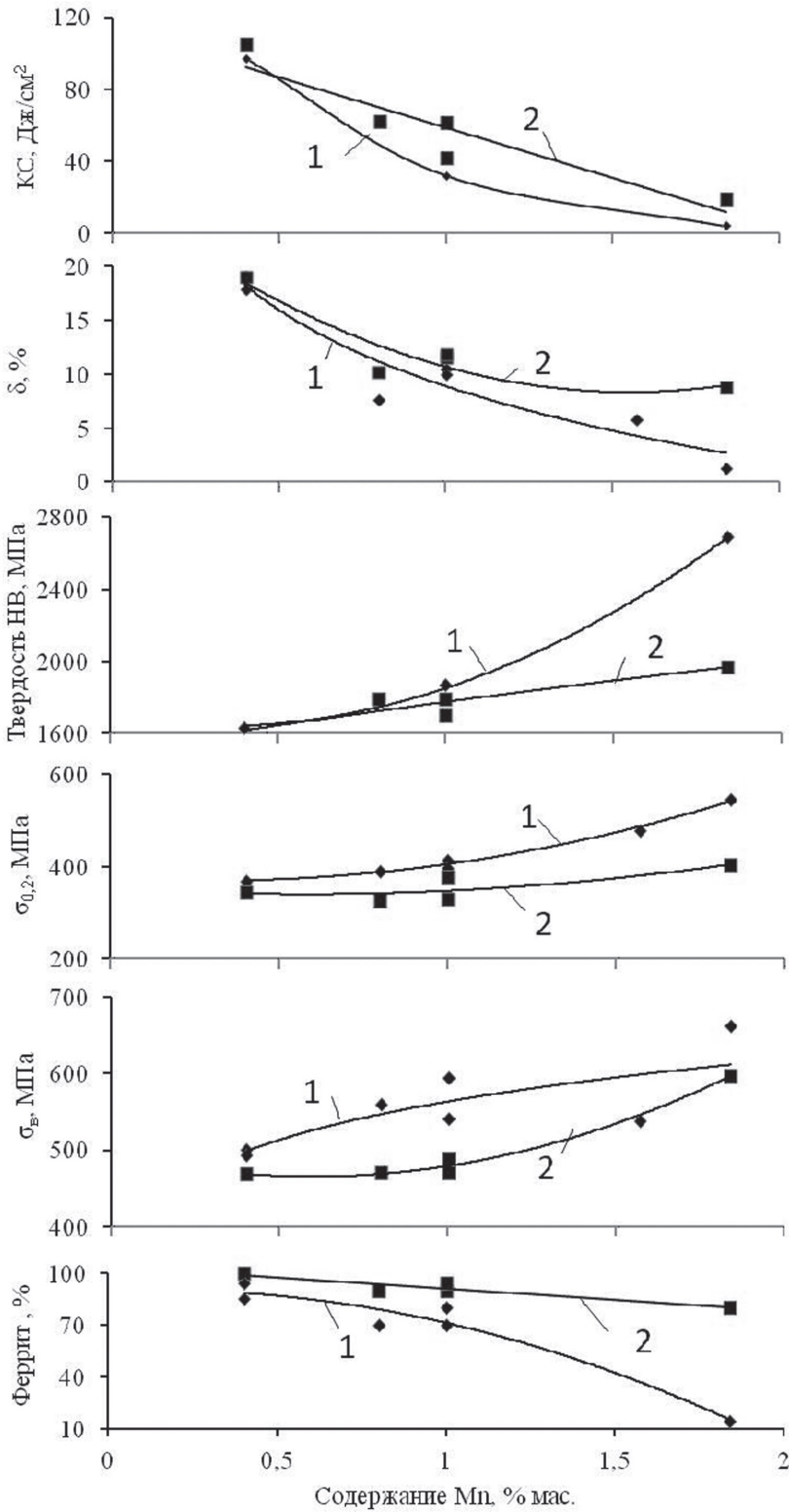


Рис. 3. Влияние содержания марганца на количество феррита и механические свойства высокопрочного чугуна, модифицированного в литейной форме: 1 – литом состоянии; 2 – после графитизирующего отжига

2 ч, охлаждение с печью до 720 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до 650 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе.

В результате отжига количество феррита в металлической основе в зависимости от содержания марганца составило 80-100 %. Это способствовало уменьшению прочности и твердости, повышению относительного удлинения и ударной вязкости. Так, при содержании в высокопрочном чугуна марганца 0,4 %, предел прочности составил 475 МПа, относительное удлинение – 19 % и твердость – 1620 МПа. Следует отметить, что при высоком содержании марганца (1,8 %) в результате отжига обеспечивается снижение твердости с 2730 до 1970 МПа и получение механических свойств  $\sigma_b = 600$  МПа и  $\delta = 9$  %.

### Выводы

Получены количественные закономерности, характеризующие влияние содержания марганца в зависимости от толщины стенки отливки на структурообразование и механические свойства высокопрочного чугуна, модифицированного в форме. Марганец является экономичным средством повышения степени перлитизации металлической основы, увеличения прочностных показателей и износостойкости высокопрочного чугуна. Показано, что в результате внутриформенного модифицирования карбидообразующее действие марганца в высокопрочном чугуна значительно ослабляется, что позволяет получать тонкостенные отливки без отбела с большой степенью перлитизации металлической основы и повышенными показателями прочности. Установлено, что повышение содержания марганца в модифицированном в литейной форме высокопрочном чугуна до 1,0-1,3 % мас. позволяет повысить степень перлитизации металлической основы и прочностные свойства без образования отбела в отливках, что является альтернативой применению дорогостоящего легирования медью, никелем или оловом. Обоснована возможность применения шихтовых материалов с высоким содержанием марганца в технологиях, основанных на применении внутриформенного модифицирования.



### Список литературы

1. Lightweight Iron Castings – Can they Replace Aluminium Castings // Foundryman. – 2003. – Vol. 96, № 9. – P. 221-224.
2. Ващенко К. И., Шумихин В. С. Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок: Учебн. пособие. – Киев: Вища шк., 1992. – 246 с.
3. Влияние содержания марганца и скорости охлаждения на кристаллизацию, структурообразование и механические свойства высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршневу, Д. С. Козак и др. // Процессы литья. – 2009. – № 6. – С. 28-34.
4. Iwo Henych. Trends in Melting and Magnesium Treatment of Ductile Iron // Word Symposium on Ductile Iron, 1998. – P. 17-73.
5. Особенности влияния кремния на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна, модифицированного в литейной форме / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Д. Н. Берчук и др. // Процессы литья. – 2011. – № 6. – С. 28-38.

Поступила 09.09.2013