

УДК 669.131.7

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

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ НИКЕЛЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧАЕМОГО МОДИФИЦИРОВАНИЕМ В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ**

*Получены экспериментальные данные об особенностях влияния легирования 1,5 % Ni на структурообразование и механические свойства отливок из модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна. Показано, что перлитизирующее действие никеля в высокопрочном чугуне, полученном внутриформенным модифицированием, проявляется в меньшей степени, чем в полученном ковшовым модифицированием, и снижается с уменьшением скорости охлаждения. Определены оптимальные условия применения легирования никелем для повышения механических свойств тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, внутриформенное модифицирование, никель, скорость охлаждения, структура, механические свойства, термическая обработка.

*Отримано експериментальні дані про особливості впливу легування 1,5 % Ni на структуроутворення і механічні властивості виливків з високоміцного чавуну, модифікованого в ливарній формі. Показано, що перлітизуюча дія нікелю у високоміцному чавуні, отриманому внутрішньоформовим модифікуванням, проявляється меншою мірою, ніж в отриманому ковшовим модифікуванням, та знижується зі зменшенням швидкості охолодження. Визначено оптимальні умови застосування легування нікелем для підвищення механічних властивостей тонкостінних виливків з високоміцного чавуну, який отримують внутрішньоформовим модифікуванням.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, внутрішньоформове модифікування, нікель, швидкість охолодження, структура, механічні властивості, термічна обробка.

*Experimental data about influence of 1,5 % Ni alloying on structure formation and mechanical properties of castings from in-mould modified ductile cast iron are obtained. It is shown that the perlitizing effect of nickel in ductile cast iron received with in-mould modifying is lesser than at ladle modifying and decreases with decreasing of cooling speed. Optimal conditions of nickel alloying application for improving mechanical properties of thin-walled castings made of in-mould modified ductile cast iron are determined.*

**Keywords:** ductile cast iron, in-mould modifying, nickel, cooling speed, structure, mechanical properties, thermal treatment.

**В**ысокопрочный чугу́н с шаровидным графитом признан во всем мире как уникальный многофункциональный материал для изготовления изделий самого ответственного назначения во всех отраслях промышленности. Высокопрочный чугу́н интегрировал в себя комплекс позитивных свойств, присущих множеству металлов, обладает высокими литейными свойствами, которые включают в себя такие параметры, как жидкотекучесть, усадка и склонность к образованию трещин. Высокая жидкотекучесть высокопрочного чугуна позволяет изготавливать любые по геометрической сложности и массе литые изделия [1]. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на дальнейшее повышение технологических, механических и эксплуатационных свойств высокопрочного чугуна и в целом качества производимых литых изделий. Высокопрочный чугу́н легируют никелем для повышения механических, а также специальных свойств: износостойкости, ударостойкости, хладостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости, немагнитности и др. [2].

### *Анализ последних достижений и публикаций*

Никель обладает неограниченной растворимостью в чугуне и поэтому не образует новых фаз. Он увеличивает растворимость углерода в жидком и твердом растворах железоуглеродистых сплавов, повышает эвтектическую температуру, одновременно понижая эвтектоидную. Никель способствует графитизации чугуна в процессе кристаллизации и тормозит ее при  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращении, повышая степень перлитизации металлической основы [3-5].

В работе [6] было установлено, что с увеличением содержания никеля в высокопрочном чугуне происходит измельчение ферритной матрицы, в то время как плотность распределения графитовых включений практически не изменяется.

Несмотря на высокую стоимость никеля, легирование им рекомендуется как для получения некоторых стандартных марок высокопрочного чугуна, что предусмотрено ДСТУ 3925-99, так и для повышения специальных свойств: ударостойкости, хладостойкости, износостойкости и др.

### *Выделение нерешенной части проблемы*

Легирование никелем позволяет повысить прочностные показатели высокопрочных чугунов со всеми типами металлической основы. В перлитных и бейнитных высокопрочных чугунах в результате диспергирования металлической основы обеспечивается благоприятное для служебных свойств изделий сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости.

Влияние никеля на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом недостаточно освещено в литературе, а по некоторым вопросам противоречиво. Прежде всего это касается влияния никеля и метода ввода модификатора (в ковш или форму) на металлическую основу и механические свойства высокопрочного чугуна. В литературе отсутствуют сведения о влиянии никеля на структуру высокопрочного чугуна в зависимости от толщины стенки отливок. Недостаточно внимания уделено термической обработке как фактору, повышающему эффект легирования никелем. С учетом изложенного очевидна актуальность проведения исследований и уточнения ряда закономерностей влияния никеля на структуру и механические свойства модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна [7].

### *Цель и методика исследований*

*Цель работы* – исследование особенностей влияния содержания никеля, условий охлаждения отливок и термической обработки на структурообразование и механические свойства высокопрочного чугуна, получаемого модифицированием в литейной форме.

На этапе лабораторного исследования плавки проводили в индукционной печи емкостью 10 кг. В качестве шихты использовали чугу́н следующего состава, в %мас.: 3,80-3,95 C; 1,95-2,38 Si; 0,18-0,24 Mn; 0,015-0,019 S; 0,047-0,062 P; 0,1 Cr, полученный переплавом в индукционной электропечи ИСТ-016 чушкового передельного чугуна марки ПЛ2 (50 %) и возврата высокопрочного чугуна (50 %). Никель в количестве 1,5 % вводили в жидкий чугу́н в конце плавки. Модифицирование магниевой

лигатурой ФСМг7 осуществляли в специальной форме с литниково-модифицирующей системой, состоящей из стояка, проточного реактора и шлакоуловителя, соединенных литниковыми каналами [7]. Модифицированный расплав по вертикальному сливному каналу поступал в нижерасположенную форму для получения ступенчатой пробы. Заливку проводили при температуре жидкого чугуна 1420-1440 °С. Расход магниевой лигатуры составлял 1,2 % от массы заливаемого расплава.

Влияние содержания никеля на структуру высокопрочного чугуна изучали на шлифах, вырезанных из ступеней, толщина которых на модели составляла 1,5; 2,5; 5; 10; 15 мм. Толщина литых ступеней варьировалась в определенных пределах, обусловленных расталкиванием формы при извлечении модели и некоторыми другими факторами. Перед проведением металлографического анализа измеряли фактическую толщину сечения в месте, подготовленном для исследования. Функциональные графики, описывающие полученные закономерности, строили по данным металлографического анализа структуры в центре ступеней.

Влияние никеля на механические свойства модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна исследовали в литом и термообработанном состояниях на образцах, вырезанных из стандартных клиновидных проб толщиной у основания 25 мм, массой 7 кг (ДСТУ 3925-99). Из клиновидных проб также вырезали образцы для металлографического анализа.

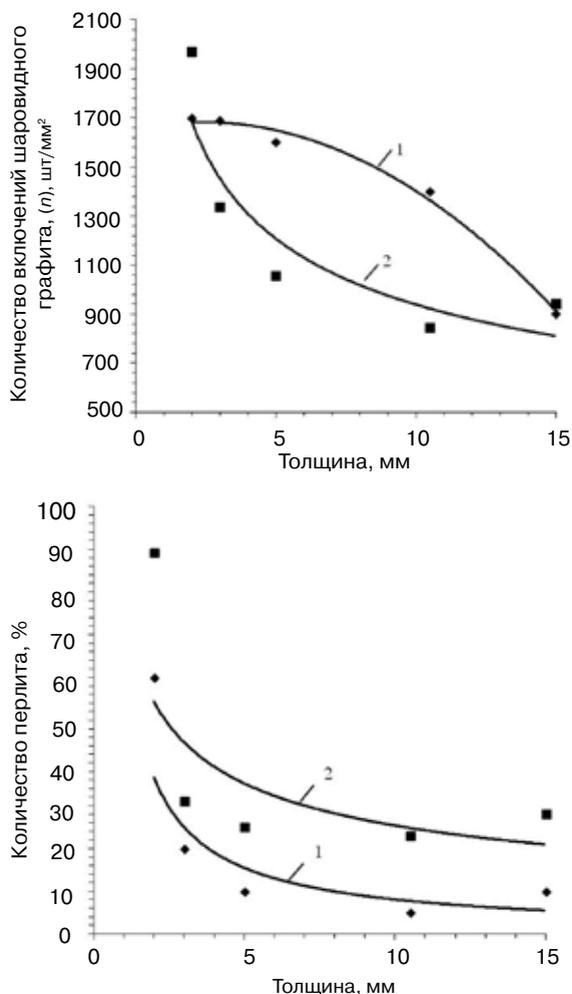


Рис. 1. Влияние содержания никеля и толщины ступени технологической пробы на микроструктуру нелегированного высокопрочного чугуна (1) и легированного 1,5 % Ni (2)

Для отливки клиновидных проб исходный чугун выплавляли в индукционной печи ИСТ-016, используя шихту из 85 % передельного чушкового чугуна ПЛ2 и 15 % отходов электротехнической (динамной) стали. В передельном чугуне содержание серы составляло 0,022 %, в динамной стали – 0,012 %. Никель в количестве 1,5 % вводили в печь в конце плавки. Модифицирование проходило в расположенном в литейной форме центробежном проточном реакторе магниевой лигатурой ФСМг7 в количестве 1 % от массы заливаемого в форму чугуна.

*Анализ полученных данных, обоснование научных результатов*

Влияние легирования никелем в количестве 1,5 % на структуру модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна изучали на ступенчатой пробе. В проведенных опытах в микроструктуре ступеней цементит отсутствовал.

Полученные экспериментальные данные о влиянии никеля на микроструктуру модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна, по данным металлографического анализа ступеней технологических проб, представлены на рис. 1 и 2. Легирование никелем уменьшает количество включений шаровидного графита в 1,5-2,0 раза во всех ступенях технологической пробы.

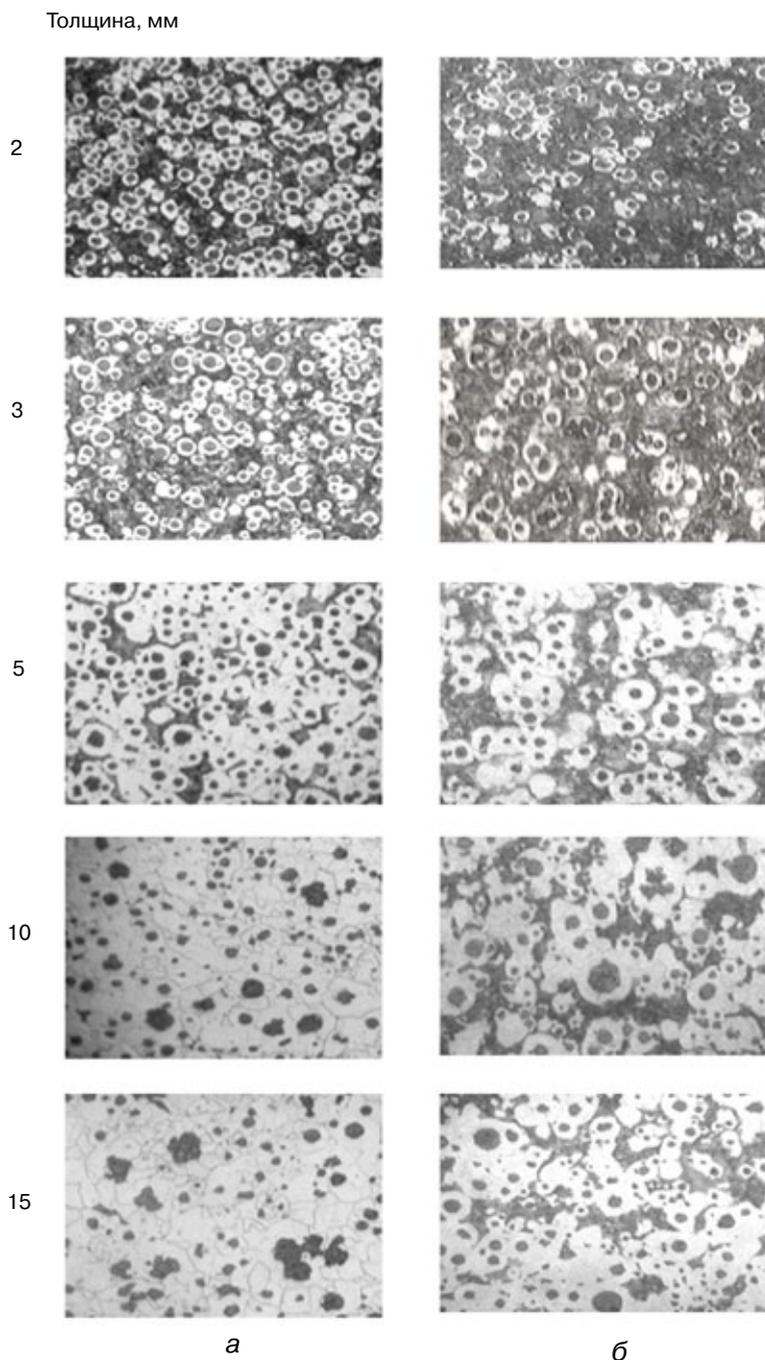


Рис. 2. Влияние никеля на микроструктуру высокопрочного чугуна в зависимости от толщины сечения ступени: *а* – нелегированный чугун; *б* – легированный 1,5 % Ni,  $\times 100$

В результате легирования высокопрочного чугуна 1,5 % Ni количество перлита в микроструктуре металлической основы ступени толщиной 2 мм увеличивается с 60 до 90 %, толщиной 3 мм – с 60 до 85 %. В ступенях толщиной 5 мм и более количество перлита увеличивается с 5-10 до 25-30 %. Таким образом, при легировании 1,5 % Ni, модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна в тонкостенных сечениях 2-3 мм обеспечивается получение перлитной металлической основы, а в более толстых (5-15 мм) формируется феррито-перлитная

металлическая основа. В высокопрочных чугунах, легированных 1,5 % Ni в ступенях толщиной 5 мм и более, скорость охлаждения оказывает незначительное влияние на перлитизацию металлической основы.

Никель по влиянию на перлитизацию металлической основы менее эффективен, чем медь [8]. При легировании 1,5 % Ni количество перлита в микроструктуре металлической основы ступенчатой пробы такое же, как у чугуна, легированного 0,5 % Cu, и значительно ниже, чем при легировании 1 % Cu.

Влияние легирования 1,5 % Ni на структуру и механические свойства высокопрочного чугуна было изучено на стандартных клиновидных пробах толщиной 25 мм в условиях опытно-промышленного производства. Микроструктура отливок из нелегированного высокопрочного чугуна состояла из включений шаровидного графита диаметром 40-45 мкм с плотностью распределения 269-309 шт/мм<sup>2</sup> и ферритной металлической основы (95 % феррита). Образцы из нелегированного высокопрочного чугуна в литом состоянии имели следующие механические свойства:  $\sigma_b = 482$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 336$  МПа; твердость (НВ) 1564 МПа;  $\delta = 18,8$  % (рис. 3). Вследствие легирования 1,5 % Ni количество перлита в металлической основе увеличилось до 15 % (остальное феррит). Таким образом, установлено, что влияние 1,5 % Ni на перлитизацию металлической основы стандартных клиновидных проб из модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна проявляется слабее (более чем в 2 раза), чем в высокопрочном чугуне, модифицированном в ковше [9], и обеспечивает получение феррито-перлитного высокопрочного чугуна с временным сопротивлением разрыву  $\sigma_b > 550$  МПа, условным пределом текучести  $\sigma_{0,2} > 450$  МПа, относительным удлинением  $\delta > 17$  %, твердостью (НВ) 2070 МПа.

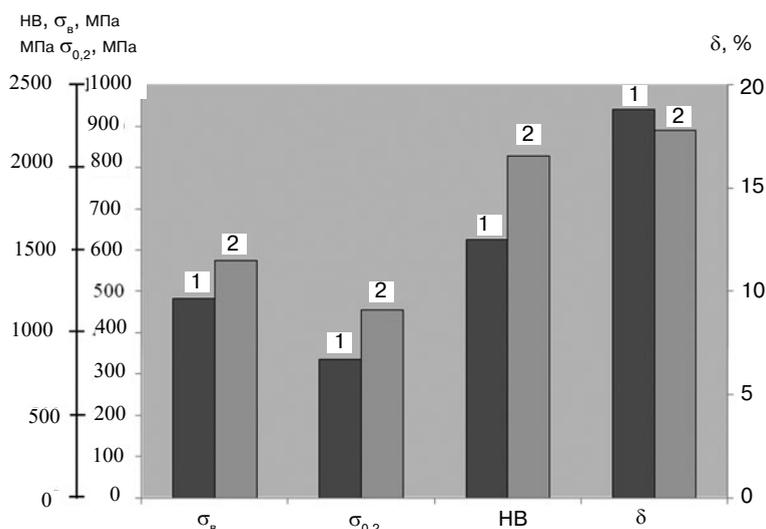


Рис. 3. Механические свойства высокопрочного чугуна (2), нелегированного (1) и легированного 1,5 % Ni

Изучено влияние термической обработки на механические свойства легированного 1,5 % Ni высокопрочного чугуна, модифицированного в литейной форме. Для получения ферритной металлической основы проводили ступенчатый графитизирующий отжиг клиновидной пробы по следующему режиму: нагрев в печи до 880 °С, выдержка 2 ч, охлаждение с печью до 750 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до 650 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. В результате отжига количество феррита в легированном никелем высокопрочном чугуне увеличилось с 85 до 100 %. По сравнению с литым состоянием высокопрочного чугуна, содержащего 1,5 % Ni, после графитизирующего отжига наблюдается незначительное уменьшение прочностных показателей, снижается твердость и повышается относительное

удлинение (рис. 4). В целом, легированный никелем ферритный высокопрочный чугун, полученный модифицированием в литейной форме, отличается от полученного ковшовым модифицированием [9] меньшими показателями прочности и более высоким относительным удлинением.

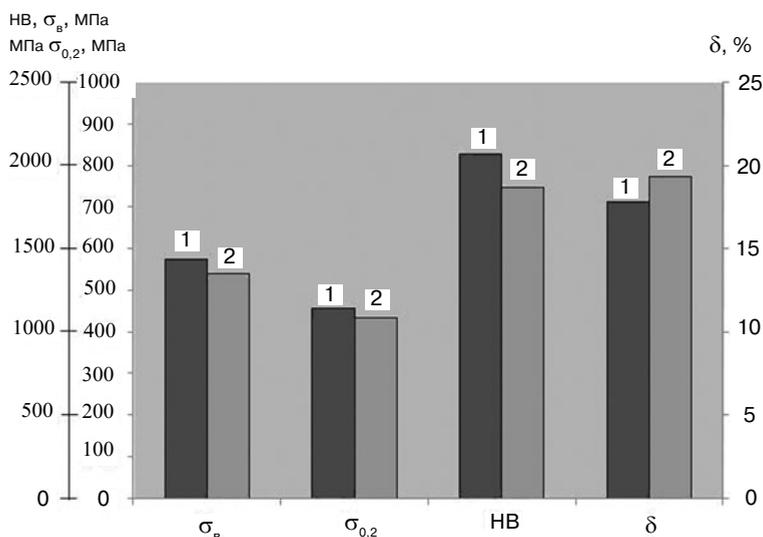


Рис. 4. Механические свойства высокопрочного чугуна, легированного 1,5 % Ni, в литом состоянии (1) и после отжига (2)

Определили влияние упрочняющих видов термической обработки (нормализации и изотермической закалки) на механические свойства легированного 1,5 % Ni высокопрочного чугуна, модифицированного в литейной форме. Нормализацию проводили по режиму: нагрев в печи до 880 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе. Условия изотермической закалки были следующими: нагрев в печи до 840 °С, выдержка 2 ч, закалка в селитровой ванне с температурой 370 °С, выдержка 1 ч, охлаждение в воде. Показатели механических свойств легированного 1,5 % Ni высокопрочного чугуна в нормализованном состоянии и после изотермической закалки представлены на рис. 5.

В результате нормализации количество перлита в металлической основе повысилось до 45 %, что обеспечило получение высоких прочностных свойств:  $\sigma_b > 700$ ,  $\sigma_{0,2} > 550$  при твердости (HV) 2550 МПа. По сравнению с нормализацией, изотермическая закалка обеспечивает получение повышенных (в 1,5 раза) показателей относительного удлинения и ударной вязкости.

В условиях промышленного производства исследовали влияние легирования никелем высокопрочного чугуна на механические свойства отливок корпусов с толщиной стенки 10 мм. Плавки проводили в индукционной электропечи ИЧТ-6 из шихты, состоящей из передельного высококачественного чушкового чугуна марки ПВКЗ (55 %) с низким содержанием вредных примесей (0,013-0,015 S; 0,02-0,03 % P) и возврата высокопрочного чугуна (45 %). В шихту вводили 1,5 % Ni (сверх 100 %). Модифицирование осуществляли магниевой лигатурой марки ФСМг7 в проточном реакторе, расположенном в литейной форме. Химический состав нелегированного высокопрочного чугуна в отливках находился в следующих пределах (%мас.): 3,41-3,80 C; 2,81-3,12 Si; 0,25-0,27 Mn; 0,15-0,17 Cr; 0,038-0,049 Mg; 0,009-0,011 S; 0,024 P. Механические свойства легированного 1,5 % Ni высокопрочного чугуна определяли в литом состоянии и после нормализации на образцах, вырезанных из корпусов.

Представленные в таблице данные механических испытаний свидетельствуют о том, что в результате легирования 1,5 % Ni механические свойства высокопрочного

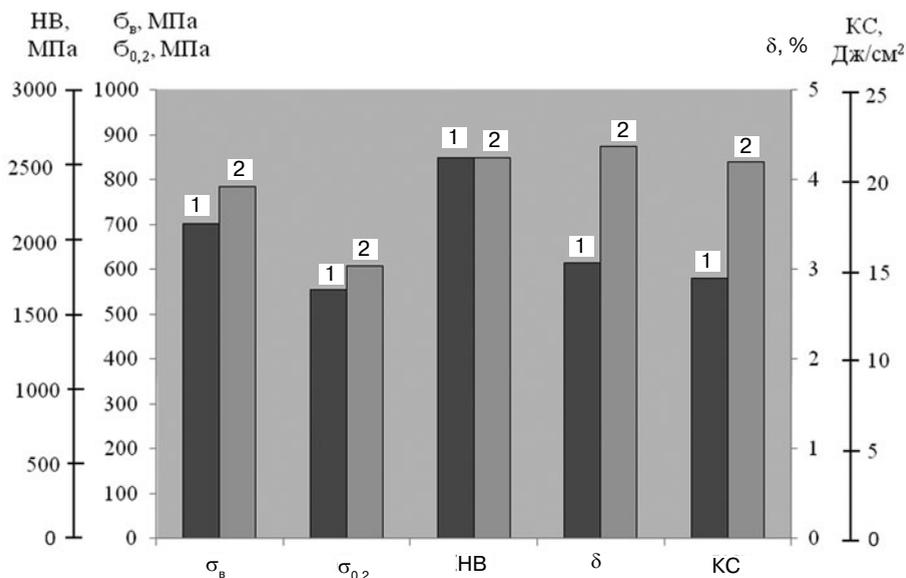


Рис. 5. Механические свойства высокопрочного чугуна, легированного 1,5 % Ni, после нормализации (1) и изотермической закалки (2)

чугуна повышаются почти на 150 МПа. При этом относительное удлинение снижается незначительно (с 14,6 до 13,3 %). Еще больше, по сравнению с нелегированным высокопрочным чугуном, прочностные показатели возрастают при сочетании легирования 1,5 % Ni с последующей нормализацией отливок. Сопротивление разрыву увеличивается на 384 МПа, условный предел текучести – на 256 МПа. При этом обеспечивается благоприятное сочетание высокой прочности и высокого для перлитного высокопрочного чугуна относительного удлинения – 9,1 %.

### **Влияние легирования 1,5 % Ni и нормализации на структуру и механические свойства отливок корпусов из высокопрочного чугуна, полученного внутриформенным модифицированием**

Высокопрочный чугун	Механические свойства				Количество феррита в металлической основе
	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	НВ, МПа	$\delta$ , %	
Исходный нелегированный	502	396	2170	14,6	80
Легированный 1,5 % Ni	650	511	2410	13,3	55
Легированный 1,5 % Ni после нормализации	886	651	2850	9,1	8

### **Выводы**

Установлены особенности влияния легирования 1,5 % Ni на структурообразование отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием. Показано, что перлитизирующее действие никеля в высокопрочном чугуне, полученном внутриформенным модифицированием, проявляется в значительно меньшей степени, чем в полученном ковшовым модифицированием, и снижается с уменьшением скорости охлаждения. По влиянию на увеличение степени перли-

тизации металлической основы и повышение прочностных показателей высокопрочного чугуна легирование никелем менее эффективно, чем медью. Определены оптимальные технологические условия применения легирования никелем для повышения механических свойств тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием.



### Список литературы

1. Возможности высокопрочного чугуна с шаровидным графитом неисчерпаемы / Н. Н. Александров, Н. И. Бех, М. В. Радченко и др. Часть 1 // Литейн. пр-во. – 2013. – № 11. – С. 7-11.
2. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. – М.: Металлургия, 1976. – 286 с.
3. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
4. Ващенко К. И., Шумихин В. С. Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок. – Киев: Вища школа, 1992. – 246 с.
5. Чугун: Справочник / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
6. Zhang Xinning, Qu Yingdong, Yang Hongwang, Li Rongde. Low temperature impact toughness and fracture mechanism of cast QT400-18L ductile iron with different Ni additions // China Foundry. – 2013. – № 5, Vol. 10. – P. 310-314.
7. Особенности влияния кремния на структуру и механические свойства отливок из модифицированного в литейной форме высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Д. Н. Берчук и др. // Процессы литья. – 2011. – № 6. – С. 23-39.
8. Влияние меди на структуру и механические свойства высокопрочного чугуна, получаемого модифицированием в литейной форме / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Д. Н. Берчук и др. // Там же. – 2012. – № 2. – С. 30-39.
9. Влияние никеля на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршневу, Д. Н. Берчук и др. // Там же. – 2011. – № 2. – С. 24-34.

Поступила 11.06.2014

УДК 669.162.275:669-154

**Ю. Д. Бачинский**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ВЛИЯНИЕ ВНУТРИФОРМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫМИ FeSiMg ЛИГАТУРАМИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА**

*Представлены результаты исследования микроструктуры комплексных FeSiMg лигатур для получения высокопрочного чугуна. Проведено исследование модифицирующей способности изученных лигатур в условиях внутриформенного модифицирования расплава. Установлено, что внутриформенное модифицирование представленными комплексными лигатурами обеспечивает получение в литом состоянии высокопрочного чугуна с повышенными прочностью и относительным удлинением, в сравнении с требуемыми по стандарту.*