
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 669.131.7:539.216

**В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, А. А. Ясинский,
Б. Г. Зеленый, Л. Н Сыропоршнев*,
Ю. Д. Бачинский, Л. А. Зеленая**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧАЕМОГО ВНУТРИФОРМЕННЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

Экспериментально установлены закономерности влияния основных технологических факторов (природы магниевых лигатур, содержания кремния в чугуна, условий охлаждения) на формирование структуры отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием. Определены технологические параметры получения отливок с толщиной стенки 2,5-3,0 мм без отбела с мелкокристаллической структурой. Показано, что высокая графитизирующая способность внутриформенного модифицирования открывает перспективу получения отливок из высокопрочного чугуна ферритного класса без проведения термической обработки.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, модифицирование, скорость охлаждения, структура, отливка.

Експериментально встановлено закономірності впливу основних технологічних факторів (природи магнієвих лігатур, вмісту кремнію в чавуні, умов охолодження) на формування структури виливків з високоміцного чавуну, який отримано внутрішньоформовим модифікуванням. Визначено технологічні параметри отримання виливків з товщиною стінки 2,5-3,0 мм без відбілу з дрібнокристалічною структурою. Показано, що висока графітізуюча здатність внутрішньоформового модифікування відкриває перспективу отримання виливків з високоміцного чавуну феритного класу без проведення термічної обробки.

Ключові слова: високоміцний чавун, модифікування, швидкість охолодження, структура, виливок.

The laws of influence of main technological factors (nature of magnesium master alloys, the silicon content in cast iron, cooling conditions) on the structure of ductile iron castings obtained at in-mould modifying are experimentally established. The technological parameters of obtaining castings with a wall thickness of 2,5-3,0 mm without chilling with a fine crystalline structure are defined. It is shown that a high graphitizing ability of in-mould modifying opens up the prospect of obtaining ferrite class ductile iron castings without heat treatment.

Keywords: ductile cast iron, modifying, cooling speed, structure, casting.

Постановка проблемы. Повышение качества отливок и разработка новых высокоэффективных технологий, обеспечивающих снижение себестоимости продукции, является одной из важнейших задач литейного производства Украины. В современном машиностроении растет потребность в отливках из высокопрочного чугуна повышенного качества, что предопределяет необходимость совершенствования традиционных технологий, основанных на методах ковшового модифицирования расплава. Прогрессивным направлением развития технологий высокопрочного чугуна является повышение эффективности модифицирования путем применения позднего внутрiformенного модифицирования в проточных реакторах, расположенных в литниковой системе. Модифицирование в литейных формах по сравнению с ковшовым характеризуется более высокой экологичностью, технологичностью и экономичностью [1].

Сближение процессов модифицирования и кристаллизации во времени стимулирует инокуляцию (увеличение числа центров кристаллизации), обеспечивает более высокий уровень сфероидизации графитных включений и эффективно предотвращает образование отбела в структуре тонкостенных отливок. При таком ходе кристаллизации в отливках формируется мелкокристаллическая структура с повышенным количеством феррита в металлической основе, обеспечивающая получение оптимальных технологических и механических свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии без проведения термической обработки (графитизирующего отжига) [2].

Анализ последних достижений и публикаций. Машиностроению требуются тонкостенные отливки из высокопрочного чугуна, способные заменить отливки из алюминиевых сплавов без увеличения массы готовых деталей. Исследование удельной (отнесенной к массе сплава) прочности и долговременной прочности литейных алюминиевых сплавов и чугуна с шаровидным графитом подтвердили техническую и экономическую перспективность применения чугунных тонкостенных отливок взамен алюминиевых [3]. В работе [4] описывается проектирование литниковых систем для горизонтальных и вертикальных форм, работающих при нормальном давлении, в которых получают отливки из высокопрочного чугуна толщиной 1,5-4,0 мм. Известно, что вакуумирование формы при заливке открывает перспективу получения отливок с еще меньшей минимальной толщиной стенки – 0,8-1,2 мм.

В результате высокой скорости кристаллизации тонкостенных отливок в их структуре наряду с шаровидным графитом формируется также и нежелательная цементитная фаза. Исследование морфологии затвердевания пластинок высокопрочного чугуна толщиной от 2 до 8 мм [5] показало, что при высокой степени переохлаждения замедляется рост шаровидного графита и образуются первичные карбиды на первой стадии затвердевания, а на последней стадии появляются карбиды обратного отбела. Образование в высокопрочном чугуне половинчатой структуры крайне нежелательно из-за необходимости проведения энергоемкого графитизирующего отжига для разложения цементитной фазы. Поэтому важнейшим показателем уровня технологии и качества высокопрочного чугуна наряду с высокой степенью сфероидизации графитных включений является отсутствие цементита в литой структуре.

На основе результатов экспериментального исследования в работе [5] показано, что для получения без отбела отливок с минимальной толщиной стенки 5 мм из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна обязательными условиями являются высокое содержание в металле отливок кремния ($3,0 \pm 0,25\%$) и проведение графитизирующего модифицирования расплава ферросилицием ФС75, который может вводиться в ковш совместно с магниевой лигатурой.

Проблема предотвращения образования цементита при кристаллизации тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна может быть решена на основе примене-

ния позднего модифицирования, сближенного во времени с началом кристаллизации. Высокая графитизирующая и инокулирующая способность внутриформенного модифицирования открывает перспективу получения из высокопрочного чугуна без отбела отливок с минимальной толщиной стенки 2,5 мм [7].

Выделение нерешенной части проблемы. Для предприятий Украины, производящих высокопрочный чугун, проблемным является получение тонкостенных отливок без отбела. Для устранения отбела отливки подвергают энергоемкому графитизирующему отжигу. Решение этой проблемы позволит улучшить качество продукции, снизить затраты на производство, расширить возможности заключения контрактов на поставку тонкостенных отливок с зарубежными фирмами. Известно, что лигатуры **FeSiMg** различных производителей практически аналогичны по содержанию магния, могут значительно отличаться эффективностью их действия на формирование заданной структуры отливок из высокопрочного чугуна. Магниево-ферритные лигатуры могут по-разному влиять на параметры структуры высокопрочного чугуна: степень сфероидизации графита, наличие или отсутствие цементита, соотношение феррит/перлит в металлической основе, которые, в свою очередь, определяют уровень механических свойств, обрабатываемость резанием, необходимость проведения термообработки для улучшения структуры и свойств изделий. Различная модифицирующая способность магниевых лигатур является следствием действия металлургической наследственности, обусловленной природой применяемых шихтовых материалов, методами плавки и ввода модифицирующих элементов, наличием и количеством примесных химических элементов, условиями кристаллизации. Отличие качественного и количественного фазовых составов лигатур влияет на кинетику их растворения и степень перехода активных модифицирующих элементов в расплав чугуна. Магниево-ферритные лигатуры одной марки, но различных производителей, могут значительно отличаться степенью окисленности магния и других активных модифицирующих элементов. В составе оксидных фаз магниевых лигатур находятся SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , CaO [8].

Учитывая вышеизложенное, представляется актуальным исследовать влияние основных технологических факторов (химического состава, условий модифицирования, толщины стенки отливки) на формирование фазово-структурного состава высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, чтобы на основании результатов исследования установить оптимальные параметры получения тонкостенных отливок без отбела с требуемыми механическими свойствами в литом состоянии.

Цель и методика исследований. Цель работы – исследование технологических факторов, регулирующих формирование структуры тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна, получаемого методом внутриформенного модифицирования.

Плавки проводили в индукционной электропечи емкостью 10 кг. В качестве шихты использовали шихтовые чугуны составов 1 и 2 (табл. 1), полученные переплавом в индукционной электропечи ИСТ-016 чушкового передельного чугуна марки ПЛ2 (50 %) и возврата высокопрочного чугуна (50 %). Необходимое содержание кремния в исходном чугуне получали добавкой в печь в конце плавки расчетного количества ферросилиция ФС75.

Модифицирование магниевой лигатурой проводили в специальной литейной форме с литниково-модифицирующей системой, состоящей из стояка, проточного

Таблица 1. Химический состав шихтовых чугунов

Шихтовый чугун	Массовая доля элементов, %мас.							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
Состав 1	3,87	0,96	0,14	до 0,1	до 0,15	-	0,017	0,026
Состав 2	4,12	0,95	0,25	до 0,1	-	до 0,1	0,026	0,055

реактора и шлакоуловителя, соединенных литниковыми каналами. Модифицированный расплав через сливной канал поступал в стояк нижней расположенной формы с гребенчатой пробой (рис. 1). Заливку в формы проводили при температуре чугуна 1450 °С. Температуру перед выпуском из печи и в ковше перед началом заливки контролировали с помощью термопары погружения.

Модифицирование осуществляли в литейной форме магниевыми лигатурами № 1 или 2 двух зарубежных фирм. Их химический состав приведен в табл. 2. Расход магниевой лигатуры составлял 1,2 % от массы заливаемого в литейную форму расплава.

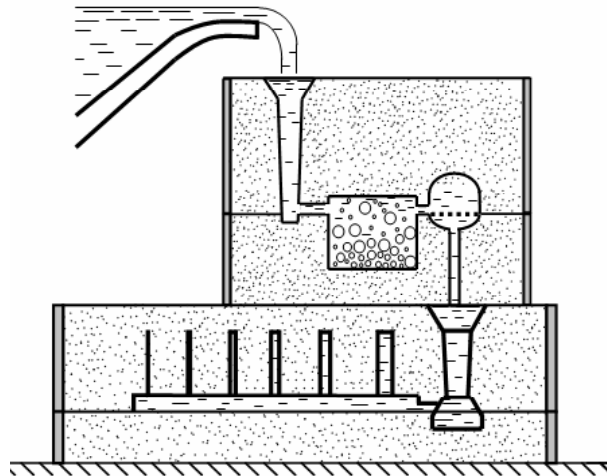


Рис. 1. Схема отливки гребенчатой пробы

Таблица 2. Химический состав магниевых лигатур

Магниевая лигатура	Массовая доля элементов, %					
	Mg	Ca	PЗМ	Al	Si	Fe
1	7,1	0,85	0,9	0,8	46,3	остальное
2	7,8	0,62	0,7	1,2	49,1	остальное

Влияние модифицирования на структуру высокопрочного чугуна изучали на шлифах, вырезанных из пластин гребенчатой пробы размером 50×50 мм и толщиной сечений в середине их высоты на модели 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 10,0 мм. Вертикально расположенные пластины гребенчатой пробы заполняли расплавом снизу через основание пробы шириной 50 и толщиной 15 мм. Металлографический анализ проводили в поперечных сечениях пластин от их центра до боковой наружной поверхности, а также в центре основания пробы.

Толщина отлитых пластин варьировалась в определенных пределах, обусловленных литейными уклонами, расталкиванием формы при извлечении модели, деформацией формы под действием давления, обусловленного ростом шаровидных включений графита при кристаллизации. Учитывая это, перед проведением металлографического анализа измеряли фактическую толщину шлифа в месте, подготовленном для исследования.

Функциональные графики, описывающие полученные закономерности, строили по данным металлографического анализа в центре пластин.

Анализ полученных данных, обоснование научных результатов. Для сравнительного исследования магниевых лигатур типа ФСМг7 двух зарубежных фирм исходный расплав получали путем переплава шихтового чугуна состава 1 в индукционной электропечи ИСТО01. Содержание химических элементов в отливках из высокопрочного чугуна варьировалось в следующих пределах (% по массе): 3,55-3,85 С; 0,12-0,18 Mn; 0,066-0,089 Mg; 0,012-0,018 S; 0,021-0,026 P. Установили, что обе лигатуры обеспечивают высокую степень сфероидизации графита (90-95 %), но значительно различаются по влиянию на степень графитизации структуры, которая характеризуется количеством цементита (или его отсутствием), плотностью распределения включений шаровидного графита, соотношением феррит/перлит в металлической основе. При модифицировании лигатурой 1 и низком содержании в металле отливок кремния (1,5 %) в структуре пластин образуется цементит, количество которого

Кристаллизация и структурообразование сплавов

в зависимости от толщины сечения изменяется в пределах от 37 до 20 % (рис. 2). В опытах, где модифицирование проводили лигатурой 2, цементит в количестве от 37 до ~12 % образуется только при кристаллизации быстроохлаждающихся пластин толщиной 2,0-2,5 мм. В результате модифицирования лигатурой 1 во всех пластинах формируется структура половинчатого чугуна с преимущественно перлитной металлической основой (феррита менее 10 %), которая при модифицировании лигатурой 2 образуется только в пластинах толщиной 2,0-2,5 мм, в структуре которых имеется цементит. В более толстых пластинах, кристаллизация которых

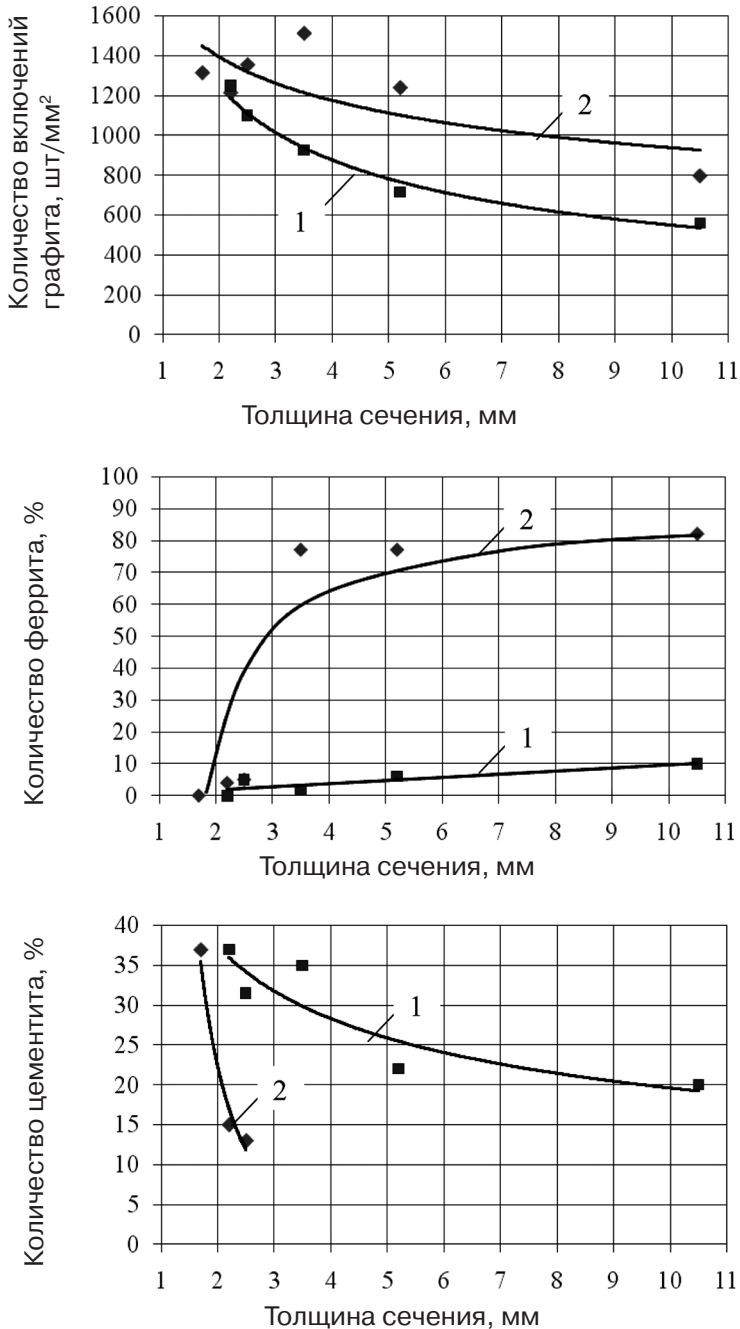


Рис. 2. Влияние магниевых лигатур и толщины сечения на микроструктуру пластин из высокопрочного чугуна, содержащего 1,5% Si: 1 – лигатура 1; 2 – лигатура 2

Таблица 3. Влияние магниевых лигатур на образование цементита в отливках пластин из высокопрочного чугуна, содержащего 2,5 % Si

Магниевая лигатура	Место на шлифе	Количество цементита (%) при толщине пластины, мм		
		2,5	3,1	3,9
1	середина пластины	15	-	-
	край пластины	15	15	12
2	середина пластины	15	-	-
	край пластины	15	12	-

проходит без образования цементита, формируется преимущественно ферритная металлическая основа (~80 % феррита). О более высокой графитизирующей способности лигатуры 2 свидетельствует и значительно большее количество включений шаровидного графита, образующихся при кристаллизации.

Основным элементом химического состава чугуна, содержанием которого регулируют степень графитизации структуры отливок, является кремний. При содержании в высокопрочном чугуне 2,5 % Si влияние исследуемых магниевых лигатур на количество образующегося цементита (табл. 3) проявляется менее контрастно. При модифицировании обеими лигатурами в структуре пластин толщиной 2,5 мм по всей площади шлифа от середины до края количество цементита составляет 15 %.

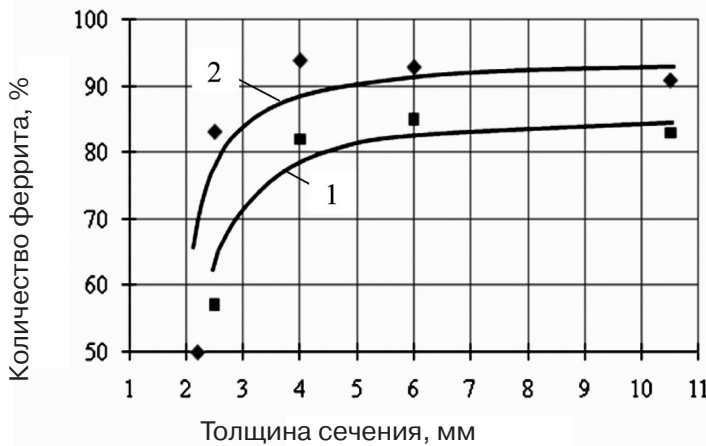
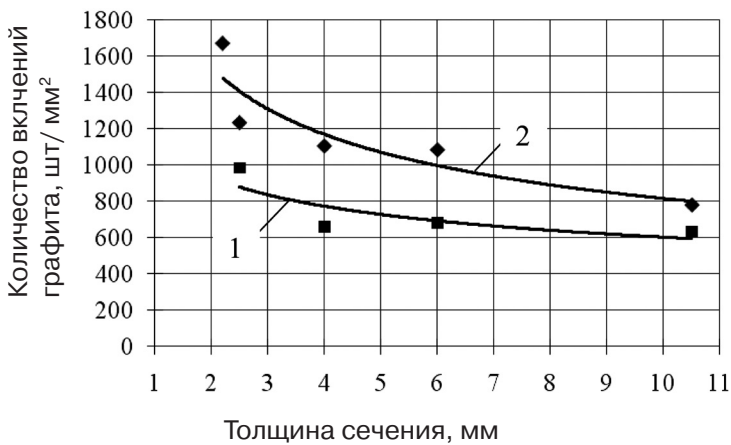


Рис. 3. Влияние магниевых лигатур и толщины сечения на количество включений графита и количество феррита в пластинах из высокопрочного чугуна, содержащего 2,5 % Si: 1 – лигатура 1; 2 – лигатура 2

Кристаллизация и структурообразование сплавов

В центре более толстых сечений цементит отсутствует, но имеется у края пластин толщиной 3,1 мм, а при модифицировании лигатурой 1 цементит в количестве 12 % наблюдается также в структуре у края пластин толщиной 3,9 мм. Таким образом, при общепринятом для высокопрочного чугуна содержании кремния 2,5-3,0 % влияние исследуемых лигатур на образование отбела в тонкостенных отливках отличается незначительно.

В структуре пластин толщиной более 4 мм, кристаллизация которых проходила без образования цементита, количество феррита в металлической основе при модифицировании лигатурой 1 составляет более 80 %, а при модифицировании лигатурой 2 – более 90 % (рис. 3). Лигатура 2 по влиянию на количество включений шаровидного графита при кристаллизации превосходит лигатуру 1 в 1,3-1,5 раза.

С учетом результатов сравнительного испытания лигатур 1 и 2, в следующих опытах по исследованию влияния содержания кремния на формирование структуры высокопрочного чугуна модифицирование проводили магниевой лигатурой 2 с более высокой графитизирующей способностью. Исходный расплав получали переплавом шихтового чугуна состава 2 в индукционной электропечи ИСТ001. Содержание химических элементов в отливках из высокопрочного чугуна варьировалось в следующих пределах (% по массе): 3,35-3,85 С; 0,18-0,24 Мн; 0,043-0,064 Mg; 0,012-0,023 S; 0,048-0,065 P.

Влияние содержания кремния в пределах от 1,5 до 2,5 % на параметры структуры пластин в зависимости от их толщины, представлено на рис. 4 и 5. При содержании в высокопрочном чугуне 1,5 % Si в структуре пластин толщиной 2,5 и 3,0 мм образуется цементит в количестве 25-30 и 15 % соответственно. Пластины большей толщины кристаллизуются без образования цементитной фазы. При содержании кремния 2,0 % количество цементита в структуре пластин толщиной 2,0 мм уменьшается до 15 %, а в структуре пластин толщиной 3,0 мм – до 5 %. При содержании в высокопрочном чугуне 2,5 % Si цементит практически отсутствовал даже в структуре самой тонкой

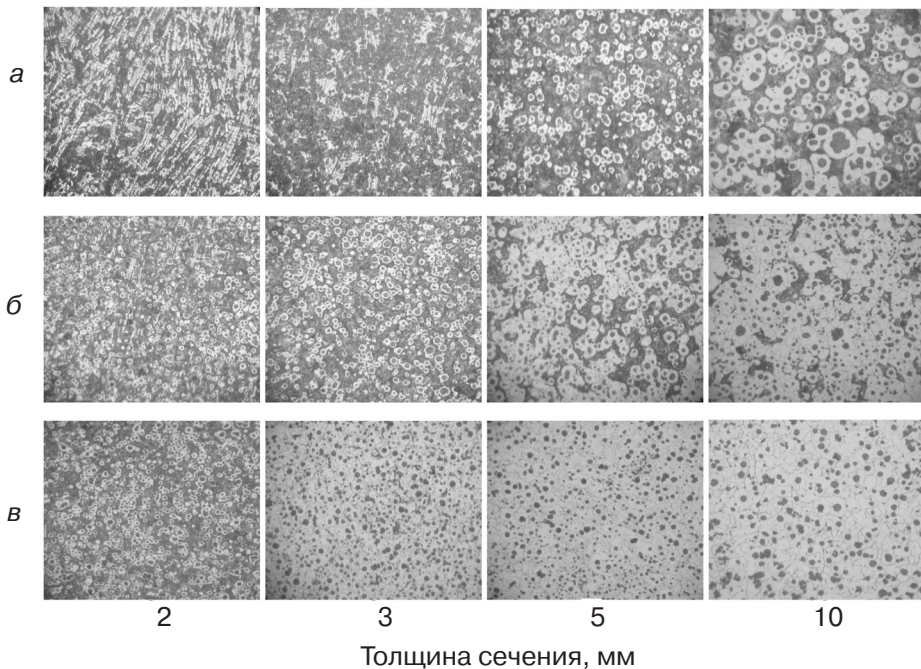


Рис. 4. Влияние кремния на микроструктуру высокопрочного чугуна в зависимости от толщины сечения пластин, %: а – 1,5 Si; б – 2 Si; в – 2,5 Si, $\times 100$

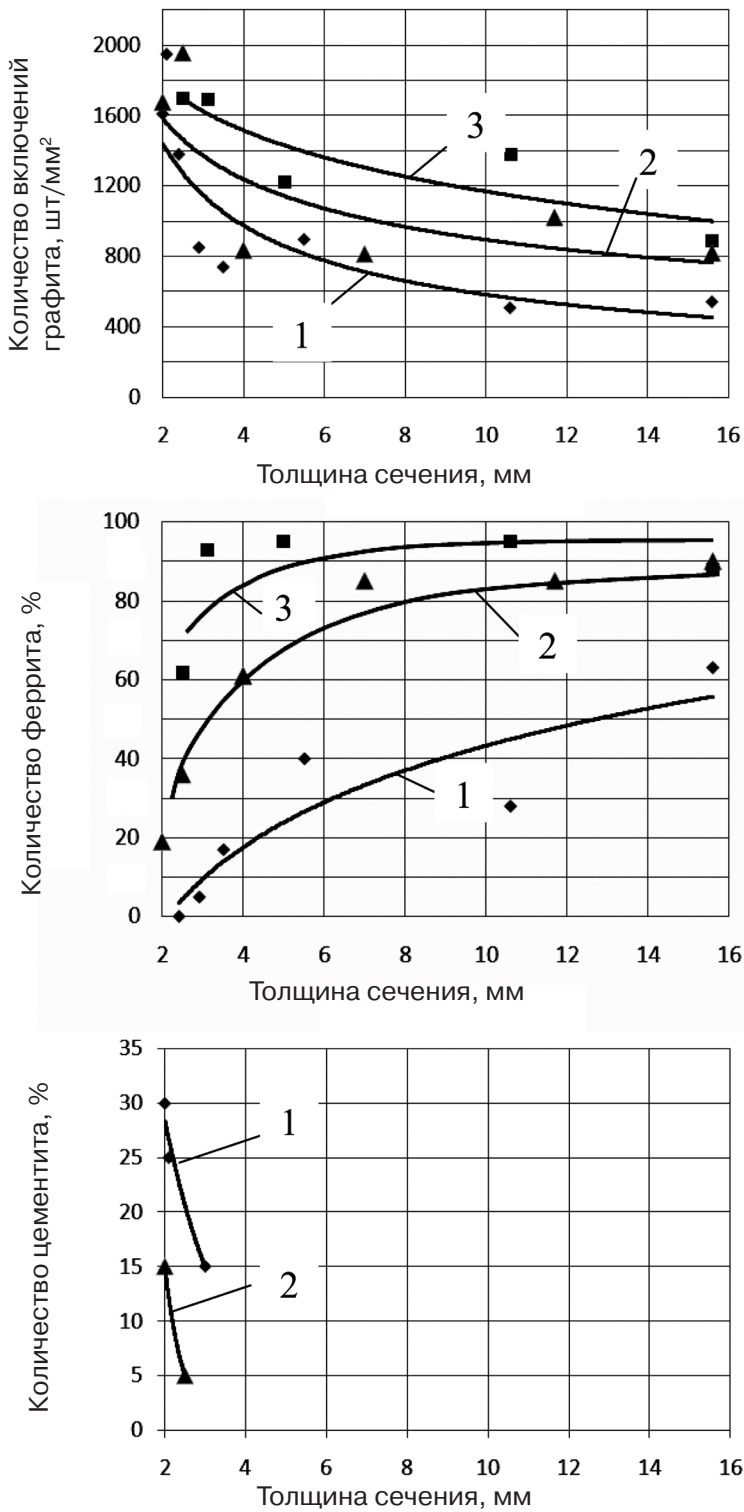


Рис. 5. Влияние содержания кремния и толщины сечения на микроструктуру пластин из высокопрочного чугуна, %: 1 – 1,5 Si; 2 – 2,0 Si; 3 – 2,5 Si

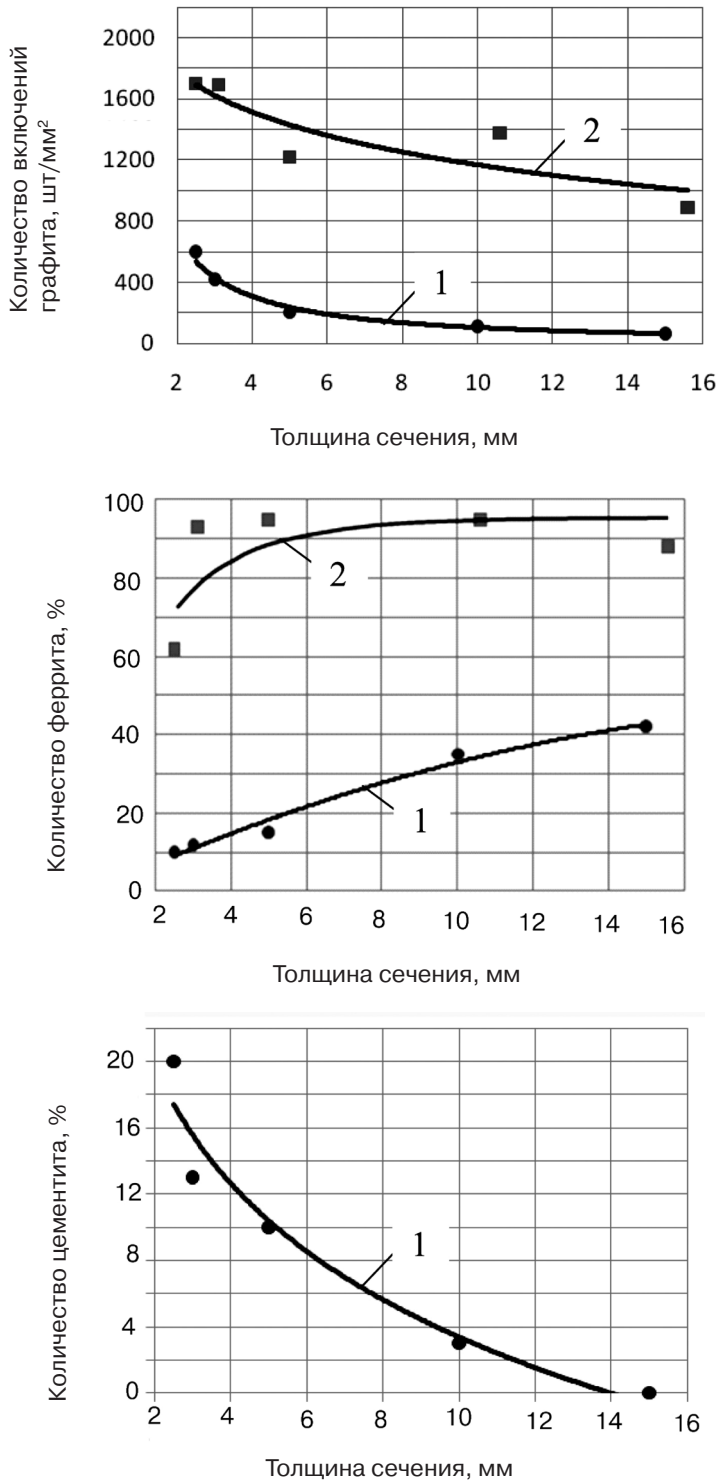


Рис. 6. Влияние условий модифицирования и толщины сечения на микроструктуру пластин из высокопрочного чугуна, содержащего 2,5 % Si: 1 – модифицирование в ковше; 2 – внутриформенное модифицирование

Кристаллизация и структурообразование сплавов

пластины толщиной 2,0 мм. В опытах с содержанием 1,5 и 2,0 % Si в пластинах с отбелом формируется преимущественно перлитная металлическая основа.

Полученные результаты свидетельствуют, что создание условий для кристаллизации пластин без отбела также способствует ферритизации металлической основы при эвтектоидном превращении. В условиях проведенного исследования при содержании в высокопрочном чугуна более 2,5 % Si в структуре пластин гребенчатой пробы толщиной от 3,0 до 15,0 мм обеспечивается получение ферритной металлической основы (более 90 % феррита). Для данных условий исследования характерной является также экспериментально установленная и представленная на рис. 5 закономерность увеличения количества включений шаровидного графита с повышением содержания кремния в высокопрочном чугуна.

Для сравнения также исследовали структуру пластин гребенчатых проб, отлитых из высокопрочного чугуна, полученного модифицированием в ковше магниевой лигатурой в количестве 2,5 % от массы расплава. Представленные на рис. 6 экспериментальные данные сравнительного исследования свидетельствуют, что в идентичных условиях эксперимента при одинаковом содержании в высокопрочном чугуна кремния (~2,5 %), в отличие от внутриформенного, при ковшовом модифицировании в структуре пластин толщиной 2,5; 3,0; 5,0; 10,0 мм образуется цементитная фаза в количестве соответственно 20; 13; 10; 3 %, плотность включений шаровидного графита уменьшается в несколько раз и формируется перлитно-ферритная металлическая основа. Кристаллизация пластины-основания гребенчатой пробы толщиной 15 мм проходит без образования цементита, что позволяет корректно сравнить влияние методов модифицирования на процессы графитизации при эвтектическом и эвтектоидном фазовых превращениях. При кристаллизации расплава, модифицированного в литейной форме, центров кристаллизации шаровидного графита формируется в 4 раза больше, чем при модифицировании в ковше и, соответственно, в результате эвтектоидного превращения количества феррита в металлической основе образуется в 2 раза больше.

Таким образом, экспериментально полученные количественные закономерности формирования фазово-структурного состава тонкостенных отливок позволяют сделать однозначный вывод о целесообразности применения внутриформенного модифицирования при производстве из высокопрочного чугуна мелких отливок с толщиной стенок менее 5 мм. Высокая графитизирующая способность позднего модифицирования, приближенного во времени к кристаллизации, открывает перспективу улучшения качества и повышения свойств отливок из высокопрочного чугуна за счет увеличения скорости охлаждения.

Выводы

Сравнительное исследование магниевых лигатур типа ФСМг7 двух производителей показало, что обе лигатуры, обеспечивая высокую степень сфероидизации графита (90-95 %), значительно отличаются по влиянию на степень графитизации структуры тонкостенных отливок в зависимости от содержания кремния в высокопрочном чугуна, что можно объяснить различиями в их металлургической наследственности. Определены технологические условия, при которых предотвращается образование цементитной фазы и формируется измельченная литая структура в отливках с толщиной стенок 2,5-3,0 мм, что улучшает качество и способствует повышению технологических, механических и эксплуатационных свойств изделий из высокопрочного чугуна при одновременном снижении их себестоимости. Внутриформенное модифицирование, интенсифицируя графитизацию при эвтектоидном

превращении, обеспечивает более чем двухкратное увеличение количества феррита в металлической основе и позволяет получать отливки из высокопрочного чугуна ферритного класса с заданным уровнем свойств без проведения термической обработки.



Список литературы

1. Пирс Дж. Модифицирование чугунов. Практика и исследования // *Металлургия машиностроения*. – 2009. – № 3. – С. 20-25.
2. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60 // *Литейн. пр-во*. – 2008. – № 11. – С. 2-8.
3. Doru M., Stefanescu, Roxana Ruxanda. Lightweight iron castings – can they replace aluminum castings // *Foundryman*. – 2003. – V. 96, № 9. – P. 221-224.
4. David P., Massone J., Boery R., Sikora J. Gating system design to cast thin wall ductile iron plates // *Foundry Trade J.* – 2009. – V.182, № 3664. – P. 119-126.
5. Pedersen K. M., Tiedje N. S. Undercooking, nodule count and carbides in thin walled ductile iron // *Foundry Trade J.* – 2009. – 182. – № 3662. – P. 54-57.
6. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршневу и др. // *Процессы литья*. – 2009. – № 4. – С. 17-24.
7. Бубликов В. Б., Берчук Д. Н. Повышение уровня модифицирования высокопрочного чугуна // *Металлургия машиностроения*. – 2006. – № 5. – С. 31-35.
8. Панов А. Г., Корниенко А. Е. О влиянии окисленности Fe-Si-Mg лигатур на свойства ЧШГ, полученного разными методами модифицирования // *Литейщик России*. – 2010. – № 1. – С. 27-34.

Поступила 06.09.2010

Вниманию авторов!

В соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.

Статьи в редакции поступают как на бумажном, так и электронном носителе. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.