

В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, Ю. Д. Бачинский, Е. Н. Берчук, В. А. Овсянников

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Влияние модификаторов при внутриформенном графитизирующем модифицировании на структуру высокопрочного чугуна

Исследовано влияние позднего графитизирующего модифицирования лигатурами FeSiBa₂₀, FeSiCa₃₀, FeSiBa₄, FeSiMg₈Ca₇ на формирование структуры тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна. Установлена высокая эффективность внутриформенного графитизирующего модифицирования, в результате которого предотвращается образование при кристаллизации цементитной фазы и формируется измельченная структура в тонкостенных отливках.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, модификатор, внутриформенное модифицирование, структура, шаровидный графит, отливка

Стабильность структуры и высокий уровень технологических, механических и служебных свойств отливок из высокопрочного чугуна достигается применением высококачественных шихтовых материалов, прогрессивных процессов плавки, модификаторов с гарантированным узкоинтервальным содержанием магния и других модифицирующих элементов, высокоэффективных методов модифицирования, легирования и термической обработки.

Проблема улучшения структурообразования тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна может быть решена повышением эффективности модифицирования. Развитие научных и технологических основ получения из высокопрочного чугуна тонкостенных отливок (без структурно-свободного цементита с повышенным уровнем механических свойств) и создание на их основе материало- и энергосберегающих процессов производства являются актуальной проблемой современного литейного производства. Разработка новых прогрессивных технологий получения из высокопрочного чугуна отливок с толщиной стенок 2-3 мм обеспечит снижение массы и повышение технико-экономических показателей современных машин и оборудования. Повышение эффективности процессов модифицирования является базисом для разработки новых марок высокопрочных чугунов многофункционального и специального назначения с повышенным уровнем механических и служебных свойств. Так, на основе многолетних исследований разработаны и стандартизованы высокопрочные бейнитные чугуны с пределом прочности при растяжении от 800 до 1600 МПа и относительным удлинением соответственно от 10 до 1 %. Из них изготавливают детали ходовой части тяжелых грузовиков, железнодорожных вагонов и другое, где усталостные свойства материала имеют решающее значение. Разрабатываются новые марки высококремнистых, аустенитных и других высокопрочных чугунов.

Прогресс машиностроения выдвигает требование производства из высокопрочного чугуна «сверхлегких» тонкостенных отливок, которые способны успешно конкурировать с отливками из алюми-

ний сплавов. Исследования удельной (отнесенной к массе сплава) прочности и долговременной прочности литейных алюминиевых сплавов и чугунов с шаровидным графитом подтвердили техническую перспективность и экономическую целесообразность применения тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна взамен алюминиевых [1].

Возможности дальнейшего развития технологий высокопрочного чугуна далеко не исчерпаны. Очевидна актуальность исследований, направленных на создание новых модификаторов, повышение эффективности процессов модифицирования, более глубокое изучение закономерностей управления формированием структуры и свойств отливок из высокопрочных чугунов.

Анализ тенденций развития свидетельствует, что наиболее перспективными являются «поздние» методы модифицирования, совмещенные с операцией заливки литейных форм [2,3]. В результате сокращения до минимума интервала времени от модифицирования расплава до его кристаллизации позднее модифицирование обеспечивает более высокий уровень модифицирующего воздействия на структурообразование высокопрочного чугуна при значительно меньшем расходе модификатора [4].

Позднее модифицирование включает методы ввода модификатора в струю инжестированием в потоке воздуха или нейтрального газа, в заливочную чашу в виде закрепляемых литых блоков, в литниковую систему в виде литых вставок или таблеток, расположенных внутри фильтров [2]. При модифицировании в струе часть химически активных элементов модификатора теряется в результате их окисления кислородом воздуха. Модифицирующие блоки, устанавливаемые в заливочной чаше, медленно растворяются, а при всплытии на поверхность металла интенсивно окисляются. В струю или заливочную чашу магнийсодержащие модификаторы обычно не вводят из-за их пиррофорности и разбрызгивания расплава чугуна. Внутриформенное модифицирование таблетками, размещенными в фильтрах, является дорогостоящим и применяется

только в технологиях с узкоинтервальным колебанием температуры заливки.

С учетом вышеизложенного и невысоким уровнем литейных технологий на предприятиях Украины представляется актуальной разработка процессов графитизирующего модифицирования для получения тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна на основе применения наиболее эффективного внутриформенного модифицирования ферросплавами на основе FeSi с химически активными щелочноземельными металлами Ba, Ca, Mg. Это позволит отказаться от импорта специальных дорогостоящих модификаторов в виде порошка, литых вставок, таблеток, специального оборудования, средств мониторинга и автоматического управления процессами модифицирования [5].

Цель исследования – разработка высокоэффективных методов управления кристаллизацией и структурообразованием для получения из высокопрочного чугуна тонкостенных отливок без структурно-свободного цементита с повышенным уровнем механических свойств и создание материало- и энергосберегающих процессов их производства.

Для исследования влияния модификаторов при внутриформенном графитизирующем модифицировании на структуру высокопрочного чугуна применяли песчано-глинистые литейные формы (рис. 1), в которых получали ступенчатые пробы с размером ступеней 60×60 мм и толщиной 1,5; 2,5; 5; 10 и 15 мм (рис. 2).

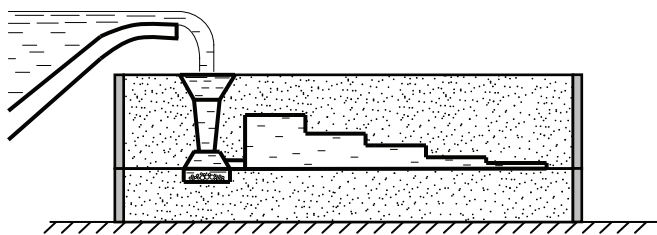


Рис. 1. Схема литейной формы для внутриформенного графитизирующего модифицирования

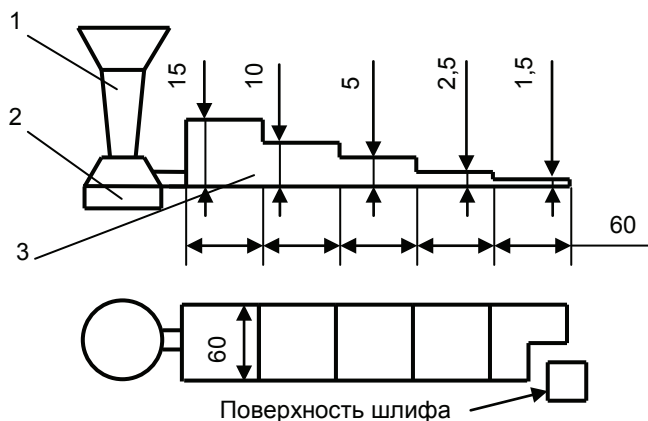


Рис. 2. Схема ступенчатой пробы и вырезка шлифов: 1 – стояк; 2 – камера для модификатора; 3 – ступенчатая проба

Ступенчатая поверхность пробы при заливке находилась сверху, что обеспечивало последовательное заполнение ступеней расплавом, начиная с наиболее удаленной от стояка ступени толщиной 1,5 мм. Ме-

таллографический анализ проводили в поперечных сечениях ступеней от их центра до боковой наружной поверхности (см. рис. 2). 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.

Выплавку металла проводили в индукционной электропечи емкостью 12 кг. В качестве шихты использовали переплав чушкового передельного чугуна марки ПЛ2 (50 %) и возврата высокопрочного чугуна (50 %). Химический состав чугуна в опытных плавках варьировался в следующих пределах (в % мас.): 3,65-3,82 C; 2,19-2,57 Si; 0,40-0,42 Mn; до 0,3 Cr; до 0,027 S; 0,044 P. Контроль температуры осуществляли термопарой в печи и ковше. Заливка форм производилась при температуре чугуна 1440 °С.

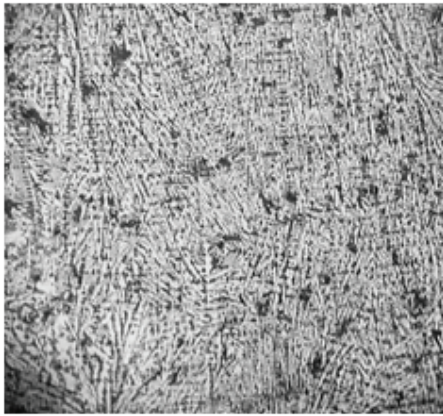
Изучали эффективность двойного модифицирования – сфероидизирующего в ковше лигатурой ЖКМК-4Р (в % мас.: 7,7 Mg; 6,7 Ca; 1,2 РЗМ; 52,1 Si; остальное Fe) и графитизирующего в литейной форме (расход 0,3 % от металлоемкости) традиционными ферросплавами FeSiBa20 (20 % Ba), FeSiCa30 (30 % Ca) и порошковым модификатором FeSiBa4 (4 % Ba), а также композиционным комплексным модификатором (ККМ) FeSiMg8Ca7 (8 % Mg; 7 % Ca), произведенным в Институте проблем материаловедения НАН Украины методом порошковой металлургии с использованием прокатки [6].

В структуре базового высокопрочного чугуна после модифицирования в ковше лигатурой ЖКМК-4Р количество цементита в сечениях ступенчатой пробы толщиной 2; 3; 7; 12 мм составило 40, 35, 13 и 4 %, соответственно. В структуре ступеней толщиной 2-3 мм образуется как первичный игольчатый, так и эвтектический цементит (ледебурит), а в структуре ступеней охлаждающихся с меньшей скоростью только эвтектический цементит (рис. 3). Степень сфероидизации графита (ССГ) – 72-80 %.

В структуре ступеней базового высокопрочного чугуна толщиной 7 и 12 мм наряду с включениями графита правильной шаровидной формы ШГф5, наблюдались включения неправильной шаровидной формы ШГф4, а местами компактной ШГф3 и вермикулярной ВГф2, ВГф3 (ГОСТ 3443-87), что соответствует степени сфероидизации графита ниже 85 %. При степени сфероидизации графита ниже общепринятого для чугуна с шаровидным графитом уровня в 85 % резко снижаются механические свойства высокопрочного чугуна.

Для оценки эффективности влияния внутриформенного графитизирующего модифицирования порошковыми модификаторами на параметры структуры высокопрочного чугуна проводили сравнение с традиционными модифицирующими ферросплавами FeSiBa20 и FeSiCa30.

В результате внутриформенного графитизирующего модифицирования FeSiBa20 цементит в



а

б

Рис. 3. Микроструктура модифицированного в ковше базового высокопрочного чугуна в сечении 2 (а) и 7 мм (б), $\times 150$

количестве до 8 % образуется в ступени толщиной 2 мм. При модифицировании FeSiCa30 цементит в количестве 2-3 % наблюдается только в некоторых участках микроструктуры ступени толщиной 2,5 мм. В остальных ступенях как при модифицировании FeSiBa20, так и FeSiCa30 цементит не образуется. При модифицировании FeSiBa20 достигается степень сфероидизации включений шаровидного графита – 95-97 %, а при модифицировании FeSiCa30 – 85-97 %.

Размерный диапазон включений графита определяется, главным образом, скоростью охлаждения и при модифицировании FeSiBa20 в ступенях толщиной 2-3; 7-12 мм составляет 5-9; 9-18 мкм, соответственно, при модифицировании FeSiCa30 – 5-8; 8-15 мкм в ступенях толщиной 2,5-3,5; 7-12 мм соответственно.

Одним из общепринятых критериев оценки эффективности графитизирующего модифицирования высокопрочного чугуна является плотность распределения включений шаровидного графита в структуре. Высокий уровень инокуляции и количество включений шаровидного графита обеспечивают оба модифицирующих ферросплава – в структуре ступеней толщиной 2-3 мм количество включений шаровидного графита достигает 1400-840 шт/мм², в ступенях толщиной 7-12 мм снижается до 580-360 шт/мм² (рис. 4) соответственно.

Количество феррита в металлической основе с уменьшением скорости охлаждения закономерно повышается: при модифицировании FeSiBa20 в ступенях толщиной 2-12 мм – от 12 до 90 % феррита, при модифицировании FeSiCa30 в ступенях толщиной 2,5-12 мм – от 5 до 60 % (рис. 5) соответственно.

Твердость отливок из высокопрочного чугуна обуславливается их структурой – с повышением степени ферритизации структуры твердость снижается. Более высокая твердость (250-195 НВ) у модифицированного FeSiCa30 высокопрочного чугуна, который, в сравнении с модифицированным FeSiBa20 (225-187 НВ), характеризуется большим количеством перлита, образующегося при эвтектоидном превращении. Относительно

высокая твердость (250 НВ) ступени толщиной 2,5 мм в варианте модифицирования FeSiCa30 обусловлена высокой дисперсностью перлита (Пд 0,3).

Влияние внутрiformенного графитизирующего модифицирования порошковыми модификаторами FeSiMg8Ca7 и FeSiBa4 на структурообразование высокопрочного чугуна представлено на рис. 6. В варианте модифицирования FeSiMg8Ca7 цементит в количестве 2-3 % образуется только в отдельных местах микроструктуры ступени толщиной 2,5 мм на расстоянии от 1,5 до 6 мм от боковой поверхности. В остальных ступенях структурно-свободного цементита нет. При модифицировании модификатором FeSiBa4 цементит в количестве 15 % образуется по всей поверхности шлифа в ступени толщиной 3 мм. Степень сфероидизации графита составляет 93-95 и 87-90 % при модифицировании FeSiMg8Ca7 и FeSiBa4, соответственно.

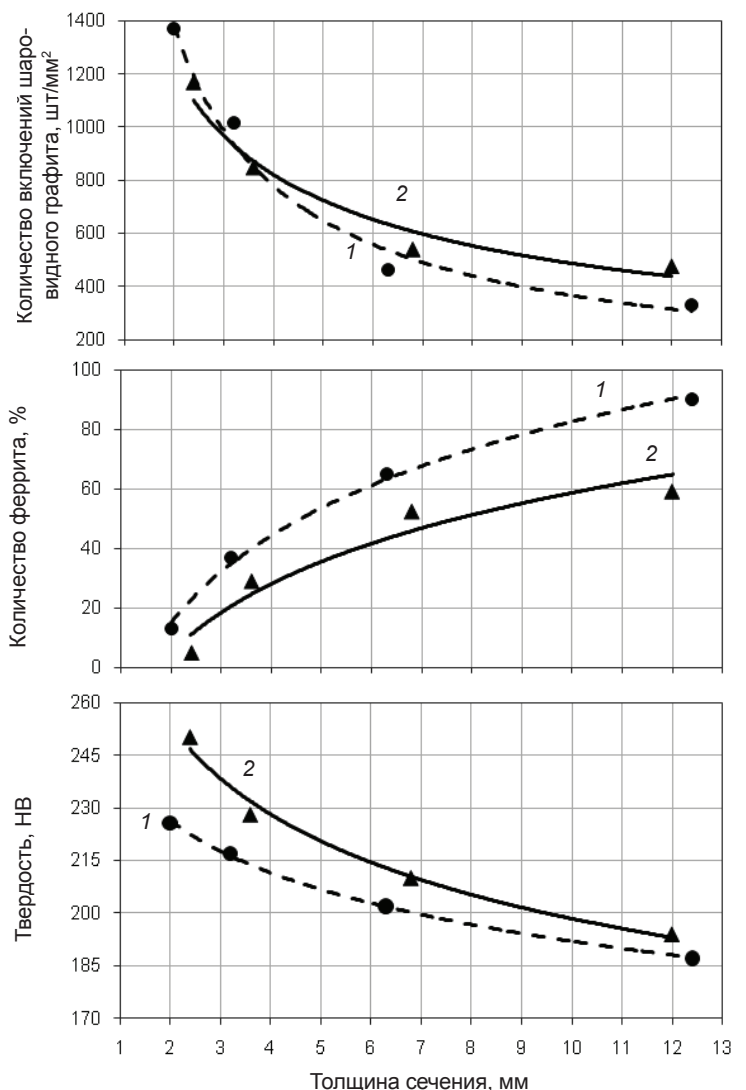


Рис. 4. Влияние графитизирующего модифицирования FeSiBa20 (1) и FeSiCa30 (2) на параметры структуры и твердость отливок из высокопрочного чугуна

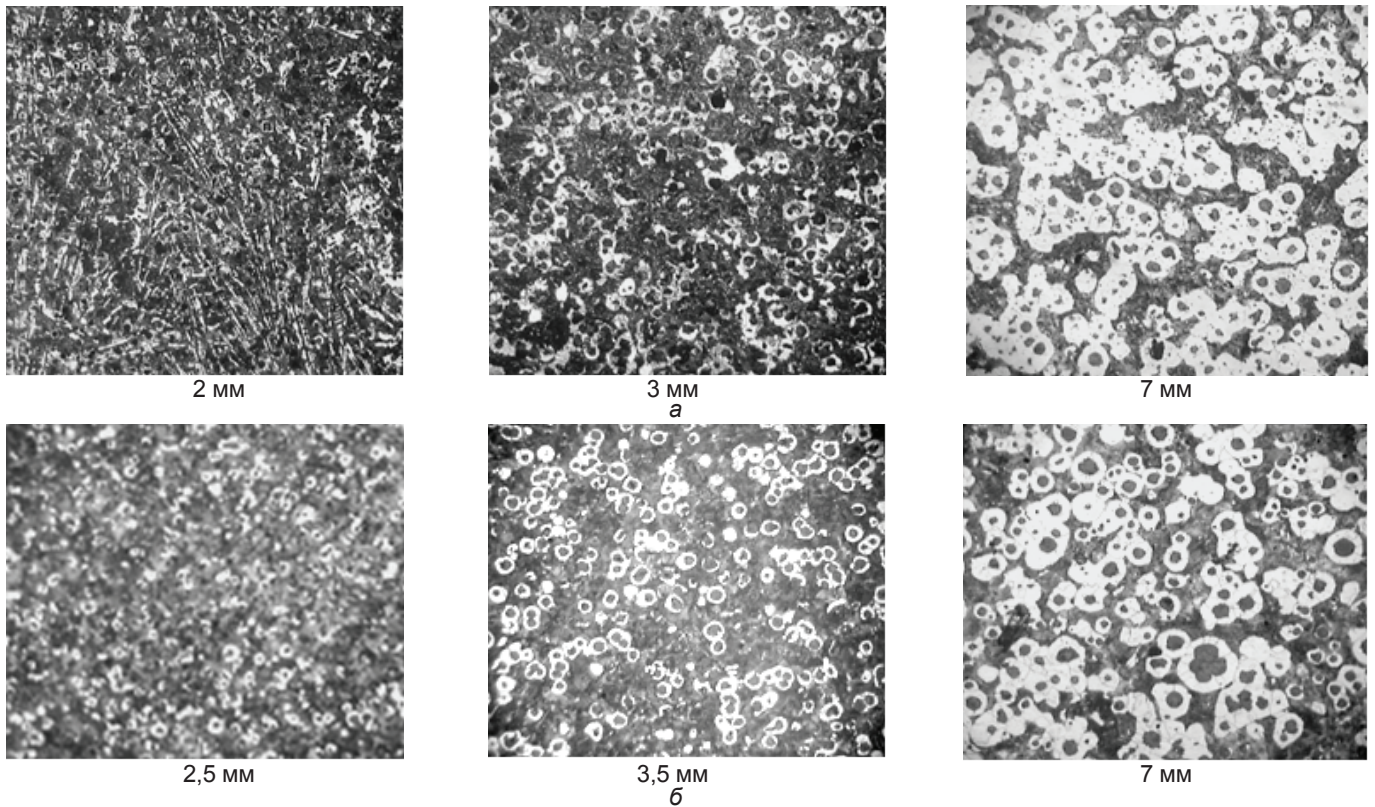


Рис. 5. Влияние графитизирующего модифицирования FeSiBa20 (а) и FeSiCa30 (б) на микроструктуру высокопрочного чугуна, x150

Размер включений графита при модифицировании FeSiMg8Ca7 в ступенях толщиной 2,5 и 3,5-12 мм составляет до 9 и 9-20 мкм, что аналогично действию модификатора FeSiBa4.

Модифицирование FeSiMg8Ca7 обеспечивает высокий уровень инокуляции шаровидного графита во всем диапазоне толщин ступеней (2,5-12 мм) и составляет 1180-440 шт/мм², что в среднем на 200 шт/мм² больше, чем при модифицировании FeSiBa4.

Количество феррита в металлической основе при модифицировании FeSiMg8Ca7 с увеличением толщины ступени закономерно повышается от 30 до 80 %, а при модифицировании FeSiBa4 в пределах от 15 до 57 % (рис. 7).

Твердость модифицированного FeSiMg8Ca7 высокопрочного чугуна составляет 180-212 НВ. При модифицировании FeSiBa4 твердость немного выше и составляет 197-225 НВ.

Таким образом, получены сравнительные экспериментальные данные о графитизирующей, инокулирующей и сфероидизирующей способности модифицирующих ферросплавов FeSiBa20 и FeSiCa30, широко распространенного порошкового модификатора FeSiBa4, а также композиционного комплексного модификатора FeSiMg8Ca7 в условиях внутриформенного графитизирующего модифицирования, проводимого после сфероидизирующей обработки расплава в ковше магниевой лигатурой.

Показана перспективность применения композиционного комплексного магний-кальциевого модификатора, который по эффективности влияния на структуру отливок из высокопрочного

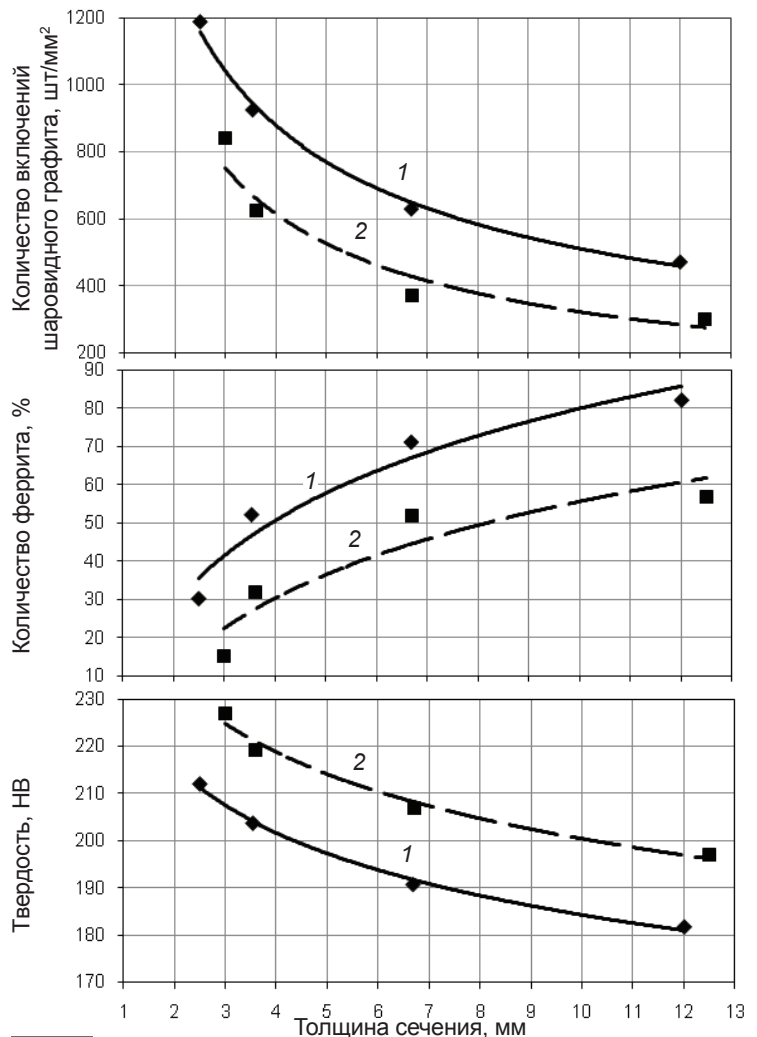


Рис. 6. Влияние графитизирующего модифицирования FeSiMg8Ca7 (1) и FeSiBa4 (2) на параметры структуры и твердость отливок из высокопрочного чугуна

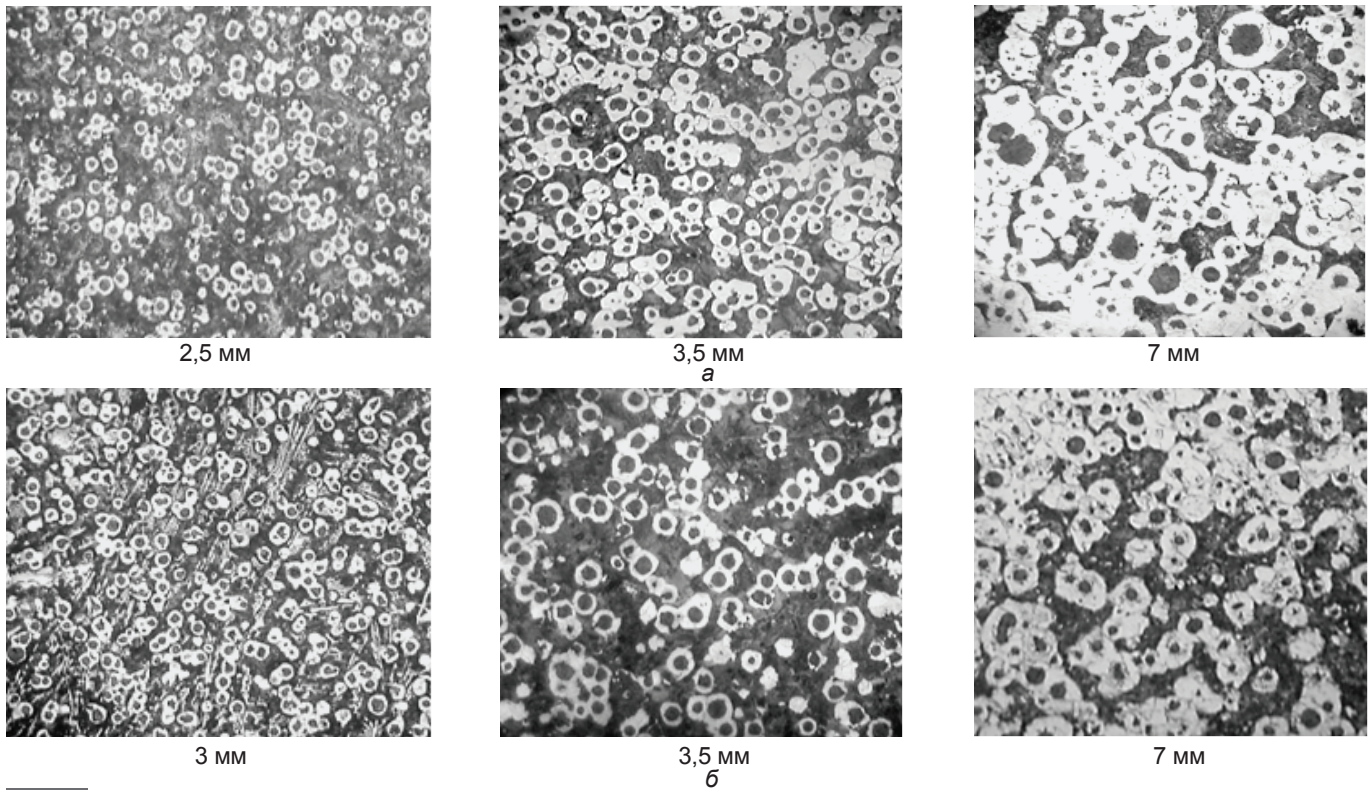


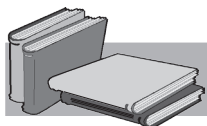
Рис. 7. Влияние графитизирующего модифицирования FeSiMg8Ca7 (а) и FeSiBa4 (б) на микроструктуру высокопрочного чугуна, x150

чугуна не уступает FeSiBa20 и даже превосходит его на 5-10 % по способности ферритизировать металлическую основу в тонких сечениях.

Выводы

Установлена высокая эффективность внутриформенного графитизирующего модифицирования расплава высокопрочного чугуна модификаторами FeSiBa20, FeSiMg8Ca7, FeSiCa30, в результате которого предотвращается образование при кристалли-

зации цементитной фазы и формируется измельченная структура в отливках с толщиной стенок от 2,5 до 12 мм. На основе результатов исследования рекомендуется после ковшевого сфероидизирующего модифицирования магниевой лигатурой проводить внутриформенное графитизирующее модифицирование расплава модификаторами, содержащими щелочноземельные металлы Ba, Mg, Ca, что позволяет улучшить структуру тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна.



ЛИТЕРАТУРА

1. Doru M. Stefanescu, Roxana Ruxanda. Lightweight iron castings – can they replace aluminum castings // Foundryman. – 2003. – V. 96. – № 9. – P. 221-224.
2. Lerner Y. S., Riabov M. V. Iron Inoculation: An Overview of Methods // Modern casting. – 1999. – № 6. – P. 37-41.
3. Csenka J. M. and other. Ductile Iron Trends: reducing costs, Improving Quality // Modern casting. – 2002. – № 5. – P. 27-29.
4. Бубликов В. Б. Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование высокопрочного чугуна // Литейное производство. – 2003. – № 8. – С. 20-22.
5. Alfred T. Spada. Expanding the Possibilities at Rochester Metal Products // Modern casting. – 2000. – V. 90. – № 3. – P. 37-40.
6. Использование метода прокатки для производства композиционных комплексных модификаторов / С. М. Волощенко, К. А. Гогаев, А. К. Радченко, М. А. Аскеров, Я. И. Евич // Процессы литья. – 2007. – № 5. – С. 41-44.

Анотація

Бубликов В. Б., Берчук Д. М., Бачинський Ю. Д., Берчук О. М., Овсянников В. О.
Вплив модифікаторів при внутрішньоформовому графітисуючому модифікуванні на структуру високоміцного чавуну

Досліджено вплив пізнього графітисуючого модифікування лігатурами FeSiBa20, FeSiCa30, FeSiBa4, FeSiMg8Ca7 на формування структури тонкостінних виливків з високоміцного чавуну. Встановлена висока ефективність внутрішньоформового графітисуючого модифікування, в результаті якого запобігається формування при кристалізації цементитної фази і формується подрібнена структура в тонкостінних виливках.

Ключові слова

високоміцний чавун, модифікатор, внутрішньоформове модифікування, структура, кулястий графіт, виливок

Summary

Bublikov V. B., Berchuk D. M., Bachinskyi Y. D., Berchuk O. M., Ovsyannykov V. O.
Influence of modifiers at in-mould graphitizing modifying on ductile cast iron structure

Influence of late graphitizing modifying with master alloys FeSiBa20, FeSiCa30, FeSiBa4, FeSiMg8Ca7 on structure formation of ductile cast iron thin-walled castings is researched. High efficiency of the in-mould graphitizing modifying which avoid cementite phase formation at crystallization and formed fine structure in thin-walled castings is established.

Keywords

ductile cast iron, modifier, in-mould modifying, structure, nodular graphite, casting

Поступила 11.06.14

Оформление рукописи для опубликования в журнале "Металл и литьё Украины":

Материалы для публикации необходимо подавать в формате, поддерживаемом Microsoft Word, размер бумаги А4, книжная ориентация, шрифт Arial – размер 10, междустрочный интервал – 1,5. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

Рукопись должна содержать:

- УДК;
- фамилии и инициалы всех авторов (на русском, украинском и английском языках);
- название статьи (на русском, украинском и английском языках);
- название учреждения(й), в котором(ых) работает(ют) автор(ы);
- аннотации на русском, украинском и английском языках;
- ключевые слова (не менее шести) – на русском, украинском и английском языках;
- предлагаемая структура текста (Arial 10, прямой) экспериментальной статьи: «Введение», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».
- таблицы должны иметь порядковый номер (Arial 10, курсив) и заголовок (Arial 10, п/ж), текст в таблице (Arial 9, прямой), примечания к таблицам размещаются непосредственно под таблицей (Arial 8, курсивом).
- формулы (Arial 11, русские символы – прямым, английские – курсивом, греческие – Symbol 12, прямым) должны иметь порядковый номер (Arial 10, прямой);
- рисунки, схемы, диаграммы и другие графические материалы должны быть черно-белыми, четкими, контрастными, обязательно иметь номер и подрисуночную подпись (Arial 9, прямой); все громоздкие надписи на рисунке следует заменять цифровыми или буквенными обозначениями, объяснение которых необходимо выносить в подрисуночную подпись;
- список литературы (Arial 9);
- ссылки нумеруются в порядке их упоминания в тексте, где они обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках (например - [1]).