

В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, Л. А. Зелёная, В. А. Овсянников

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Влияние кремния и магния на структуру высокопрочного чугуна модифицированного в предкристаллизационном периоде

Исследовано влияние содержания кремния, магния и скорости охлаждения на параметры структуры высокопрочного чугуна, модифицированного в предкристаллизационном периоде. Установлено, что скорость охлаждения в большей мере определяет структурообразование тонкостенных отливок, чем изменение содержания кремния и магния в высокопрочном чугуне.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, внутриформенное модифицирование, структура, шаровидный графит, скорость охлаждения

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом является прогрессивным литым конструкционным материалом, который, по сравнению со сталью, позволяет создавать более сложные конструкции, обеспечивает снижение массы деталей, улучшение обрабатываемости резанием, повышение коэффициента использования металла. В традиционных технологиях для получения в чугуне шаровидного графита преимущественное распространение получило модифицирование расплава магниевыми лигатурами в ковшах [1]. Введение магния в жидкий чугун приводит к переохлаждению расплава и наряду со стабильной эвтектикой «аустенит-шаровидный графит» в процессе кристаллизации может образовываться также метастабильная аустенито-цементитная эвтектика (ледебурит), а при высоких скоростях охлаждения – и первичный цементит. Образование структуры половинчатого высокопрочного чугуна крайне нежелательно, во-первых, из-за риска образования в отливках усадочных дефектов вследствие увеличения величины объёмной усадки и, во-вторых, из-за необходимости проведения длительного энергоёмкого высокотемпературного отжига для разложения образовавшейся при кристаллизации цементитной фазы, что значительно увеличивает расходы на получение товарной продукции. Поэтому наряду с высокой степенью сфероидизации графитных включений важнейшим показателем уровня технологии и качества высокопрочного чугуна является отсутствие первичного и эвтектического цементита в литой структуре.

В последнее время значительная часть исследований в области высокопрочного чугуна направлена на повышение эффективности модифицирующего воздействия на процесс кристаллизации тонкостенных отливок для получения их без отбела и с повышенным комплексом технологических, механических и служебных свойств [2, 3, 4]. Но, как известно, при характерных для тонкостенных отливок высоких скоростях охлаждения увеличивается степень переохлаждения расплава, снижается температура эвтектической кристаллизации, в результате чего созда-

ются условия для образования при кристаллизации наряду с шаровидным графитом первичного и эвтектического цементита в соответствии с метастабильным вариантом диаграммы Fe-C-сплавов. В традиционных технологиях ковшового модифицирования предельной для получения без отбела считается стенка отливки толщиной 5 мм [5]. Решить задачу получения без отбела отливок со значительно меньшей предельной толщиной стенки позволяет экспериментально установленная высокая графитизирующая способность внутриформенного модифицирования, максимально приближённого во времени к началу процесса кристаллизации [6].

Задача предотвращения образования цементита при кристаллизации небольших по массе тонкостенных отливок может быть решена путём модифицирования расплава в предкристаллизационном периоде, которое по сравнению с другими методами модифицирования в наибольшей мере стимулирует зарождение центров эвтектической кристаллизации и интенсифицирует процесс графитизации структуры. В результате этого формируется мелкокристаллическая структура, увеличивается доля феррита в металлической основе, уменьшается усадка, что способствует получению благоприятного сочетания прочности и пластичности высокопрочного чугуна в литом состоянии.

Наряду с модифицированием, к главным факторам регулирования степени графитизации структуры и свойств отливок также относятся химический состав и условия охлаждения. Из химических элементов наибольшую графитизирующую способность проявляет кремний, который эффективно повышает активность углерода в расплаве и твёрдом растворе. Магний способствует кристаллизационному переохлаждению – снижению температуры эвтектической кристаллизации на 5-30 °С в зависимости от интенсивности охлаждения расплава в предкристаллизационном периоде и в процессе кристаллизации. Оптимизация содержания кремния и магния является важной составляющей комплекса технологических факторов, обеспечивающих предотвращение

отбела отливок. Из вышеизложенного очевидна актуальность исследования влияния содержания кремния и магния в зависимости от условий охлаждения на структуру и механические свойства высокопрочного чугуна, получаемого модифицированием расплава в предкристаллизационном периоде.

Цель работы – исследовать особенности влияния содержания кремния, магния и скорости охлаждения на параметры структуры высокопрочного чугуна, модифицированного в предкристаллизационном периоде.

В исследованиях использовали выплавленный в индукционной электропечи расплав чугуна следующего химического состава (%мас.): 3,22-3,58 С; 2,10-2,74 Si; 0,21-0,26 Mn; 0,015-0,02 S; 0,10-0,17 Cr; 0,043-0,049 P. Для модифицирования расплава в литейной форме использовали магниевую лигатуру ФСМg6 в количестве 1,0-1,5 % от массы заливаемого расплава.

Влияние содержания кремния и магния на структуру высокопрочного чугуна изучали на шлифах, вырезанных из пластин ступенчатой пробы (рис. 1), толщина которых варьировалась в определённых 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 каждой ступени в зависимости от скорости охлаждения $V_{\text{охл}}$, определяемой по формуле:

$$V_{\text{охл}} = -1,40583 + 29,6826 / \delta \quad [7],$$

где δ – толщина ступени, мм.

Результаты исследования влияния кремния при содержании магния 0,048 % на параметры структуры ступенчатой пробы представлены на рис. 2. Максимальное количество включений шаровидного графита образуется в структуре ступени, охлаждающейся со скоростью 13,4 °С/с, что соответствует толщине ступени 2 мм и с увеличением содержания кремния от 2,6 до 3,24 % увеличивается с 1549 до 1887 шт/мм². В структуре ступени, охлаждающейся со скоростью 7,1 °С/с, толщиной 3,5 мм, с увеличением содержания кремния количество включений графита увеличивается с 840 до 1219 шт/мм². В структуре ступеней, охлаждающихся со скоростью 2,8 и 1,1 °С/с, толщиной 7 и 12 мм, количество включений изменяется от 495 до 750 и от 550 до 592 шт/мм² соответственно.

На количество включений графита в структуре ступени, охлаждающейся с максимальной скоростью – 13,4 °С/с, скорость охлаждения технологической пробы на микроструктуру и твёрдость высокопрочного чугуна, °С/с: 13,4 (1), 7,1 (2), 2,8 (3) и 1,1 (4)

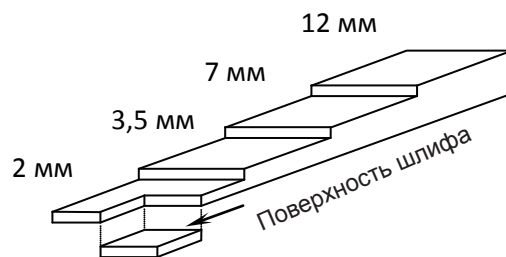


Рис. 1. Схема ступенчатой пробы и вырезки шлифов

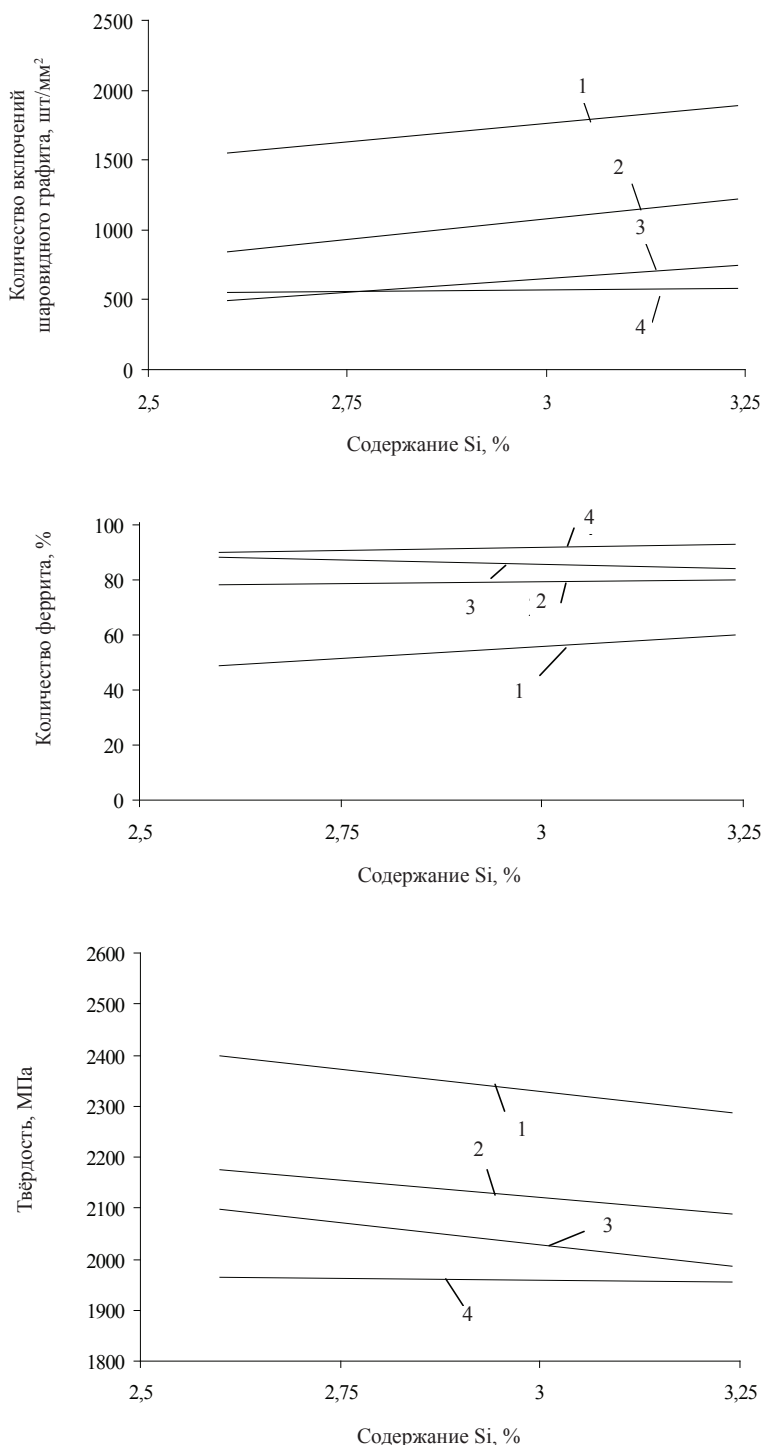


Рис. 2. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения технологической пробы на микроструктуру и твёрдость высокопрочного чугуна, °С/с: 13,4 (1), 7,1 (2), 2,8 (3) и 1,1 (4)

увеличении скорости охлаждения с 7,1 до 13,4 °С/с в исследованном диапазоне содержания кремния количество включений увеличивается в 1,6-1,8 раз, тогда как в результате изменения содержания кремния в ступени, охлаждающейся со скоростью 13,4 °С/с, всего в 1,2 раза.

При максимальной скорости охлаждения с увеличением содержания кремния количество феррита увеличивается с 49 до 60 %. В структуре ступеней толщиной 3,5; 7 и 12 мм, охлаждающихся со скоростью 7,1; 2,8 и 1,1 °С/с, изменение содержания кремния влияет незначительно и количество феррита в среднем составляет 79, 87 и 92 % соответственно.

При увеличении скорости охлаждения с 7,1 до 13,4 °С/с в исследованном диапазоне содержания кремния количество феррита увеличивается в 1,3-1,6 раз, а в результате изменения содержания кремния – в 1,2 раза.

С увеличением содержания кремния в ступенях, охлаждающихся со скоростью 13,4; 7,1; 2,8 и 1,1 °С/с, твёрдость снижается незначительно и в среднем составляет 2348, 2130, 2040 и 1960 МПа соответственно. При повышении содержания кремния и уменьшении скорости охлаждения твёрдость снижается, что связано с уменьшением количества перлита в структуре ступенчатых проб.

Результаты исследования влияния магния при содержании кремния 3,24 % на параметры структуры ступенчатой пробы представлены на рис. 3. Максимальное количество включений шаровидного графита образуется в структуре ступени, охлаждающейся со скоростью 13,4 °С/с, и с увеличением содержания Mg с 0,048 до 0,085 % количество включений увеличивается с 1577 до 2004 шт/мм². В структуре ступени, охлаждающейся со скоростью 7,1 °С/с, образуется от 702 до 1501 шт/мм². В структуре ступеней, охлаждающихся со скоростью 2,8 и 1,1 °С/с, количество включений увеличивается с 620 до 736 и с 523 до 612 шт/мм² соответственно.

Влияние скорости охлаждения на образование включений графита в структуре ступени, охлаждающейся с максимальной скоростью – 13,4 °С/с, как и при изучении влияния кремния, проявляется в большей мере, чем влияние содержания магния. При увеличении скорости охлаждения с 7,1 до 13,4 °С/с в исследованном диапазоне содержания магния количество включений шаровидного графита увеличивается в 1,4-2,2 раза, тогда как при изменении содержания магния – в 1,3 раза.

При увеличении содержания магния в структуре ступени, охлаждающейся со скоростью 13,4 °С/с, количество феррита уменьшается с 65 до 25 %. В структуре ступеней, охлаждающихся со скоростью 7,1; 2,8 и 1,1 °С/с, с увеличением содержания магния количество феррита снижается с 79 до 75 %, с 90 до 75 % и с 93 до 88 % соответственно. Влияние максимальной скорости охлаждения

и содержания магния на количество образовавшегося феррита сопоставимо.

С увеличением содержания магния в ступени, охлаждающейся со скоростью 13,4 °С/с, твердость увеличивается с 2172 до 2552 МПа. В структуре ступеней, охлаждающихся со скоростью 7,1; 2,8 и 1,1 °С/с, твердость в среднем составляет 2108, 2017 и 1956 МПа.

Установлено, что скорость охлаждения в большей мере определяет структурообразование тонкостенных отливок, чем изменение содержания в высокопрочном

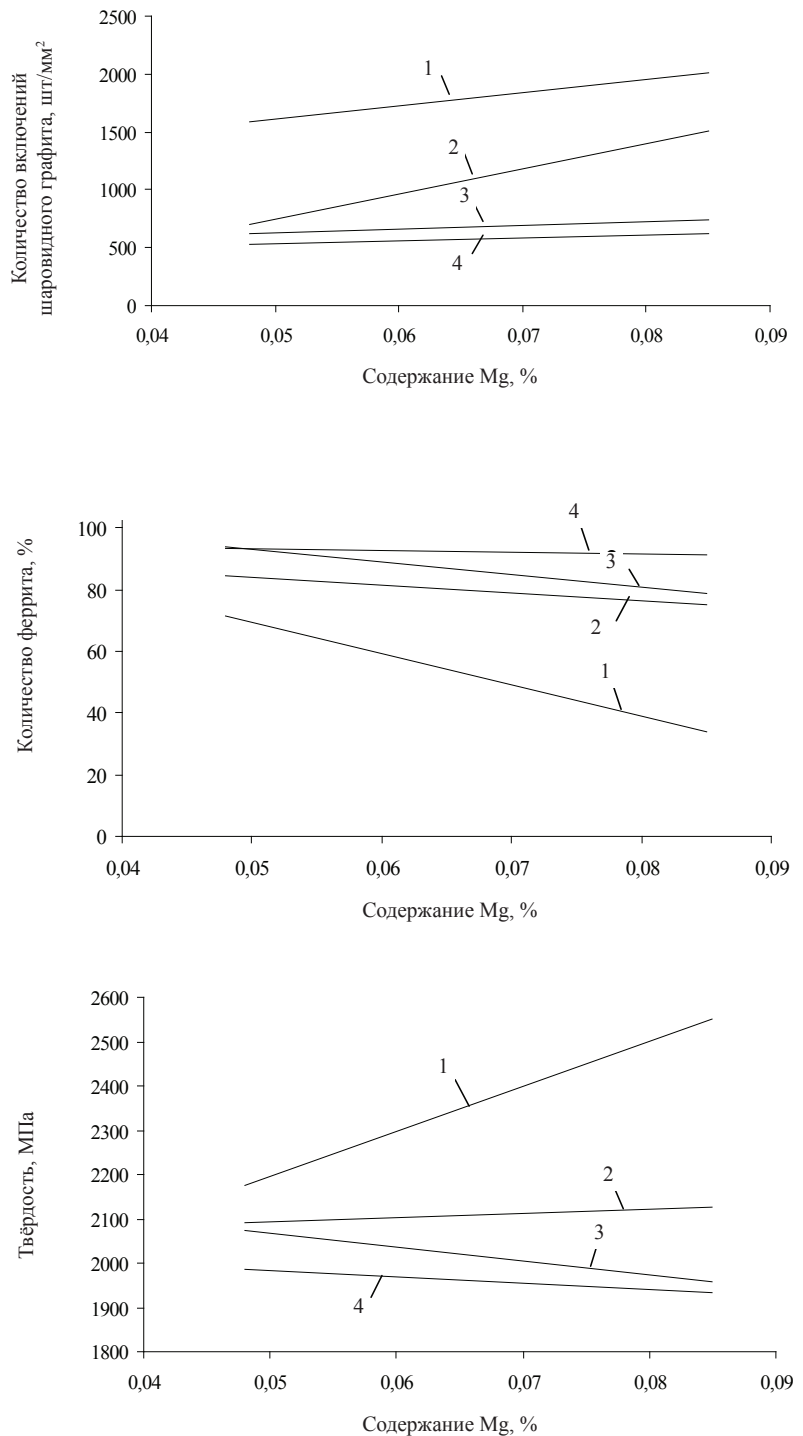
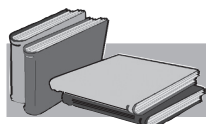


Рис. 3. Влияние содержания магния и скорости охлаждения технологической пробы на микроструктуру и твёрдость высокопрочного чугуна, °С/с: 13,4 (1), 7,1 (2), 2,8 (3) и 1,1 (4)

чугуне кремния в диапазоне 2,6-3,24 % и магния в диапазоне 0,048-0,085 %. Максимальное влияние кремния и магния на увеличение количества включений шаровидного графита в ходе кристаллизации наблюдается при скоростях охлаждения 13,4 и 7,1 °C/с, характерных для ступеней толщиной 2,0 и 3,5 мм. Максимальное их влияние на изменение количества феррита и твёрдости наблюдается при высокой скорости охлаждения – 13,4 °C/с. С уменьшением скорости охлаждения до 1,1 °C/с влияние этих факторов на параметры структуры и твёрдость проявляется в меньшей мере.

Показано, что модифицирование в предкристаллизационном периоде в сочетании с фиксацией эффекта модифицирования быстрой кристаллизацией открывает перспективу получения из высокопрочного чугуна отливок с минимальной толщиной стенок 2,0-3,5 мм без отбела с мелкокристаллической структурой, феррито-перлитной металлической основой и повышенными механическими свойствами.



ЛИТЕРАТУРА

1. Lerner Y. S. Overview of ductile iron treatment methods / Y. S. Lerner // Foundry Trade journal. – 2003. – V. 177. – P. 25-27.
2. Pedersen K. M. Undercooling, nodule count and carbides in thin walled ductile iron / K. M. Pedersen, N. S. Tiedje // Foundry Trade J. – 2009. – 182. – № 3662. – P. 54-57.
3. Torbjorn Skaland. A new method for chill and shrinkage control in ladle treated ductile iron / Torbjorn Skaland // Foundry Trade Journal – 2004. – №12. – P. 396-400.
4. Болдырев Д. А. Основные текущие и перспективные направления исследовательских работ, проводимых в чугунолитейном производстве МТП ОАО «АВТОВАЗ» // Литейщик России. – 2010. – № 12. – С. 21-26.
5. 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, Д. С. Козак, Ю. Д. Бачинский // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 17-24.
6. Бубликов В. Б. Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование высокопрочного чугуна // Литейное производство. – 2003. – № 8. – С. 20-22.
7. Берчук Д. Н. Влияние позднего графитизирующего модифицирования и скорости охлаждения на формирование структуры тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна // Металл и литье Украины. – 2012. – № 5. – С. 36-41.

Анотація

Бубликов В. Б., Берчук Д. М., Зелена Л. О., Овсянников В. О.
Вплив кремнію та магнію на структуру високоміцного чавуну модифікованого в передкристалізаційному періоді

Досліджено вплив вмісту кремнію, магнію і швидкості охолодження на параметри структури високоміцного чавуну, модифікованого в передкристалізаційному періоді. Встановлено, що швидкість охолодження в більшій мірі визначає структуроутворення тонкостінних виливків, ніж зміна вмісту кремнію і магнію в високоміцному чавуні.

Ключові слова

високоміцний чавун, внутрішньоформове модифікування, структура, кулястий графіт, швидкість охолодження

Summary

Bublikov V., Berchuk D., Zelena L., Ovsyannykov V.
Influence of silicon and magnesium on structure of ductile iron modified in subcrystallization period

The influence of silicon and magnesium content and cooling rate on the structure parameters of ductile iron modified in subcrystallization period is researched. It is established that the cooling rate determines more the structure formation of thin-walled castings than changing of silicon and magnesium content in ductile cast iron.

Keywords

ductile cast iron, in-mould modifying, structure, nodular graphite, cooling rate

Поступила 13.07.2015