

УДК 621.74

Фесенко М. А., Лукьяненко И. В.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ ПОСЛЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧУГУНА

Среди применяемых конструкционных материалов в промышленности особое место принадлежит высокопрочному чугуна с шаровидным графитом.

В мировой и отечественной практике из этого материала изготавливают широкую номенклатуру изделий (деталей), например, блоки цилиндров, тормозные барабаны, диски сцепления, поршневые кольца, кронштейны, коленчатые и распределительные валы, крышки подшипников, ступицы колес, зубчатые колеса, корпусные детали и другие [1–3].

Широкое применение чугуна с шаровидным графитом обусловлено сочетанием в нем одновременно высоких физико-механических характеристик и хороших технологических свойств, которые дают возможность в ряде случаев с большим экономическим эффектом применять его для деталей, обычно производимых из стали, ковкого чугуна, бронзы и других материалов [1–3].

Современное производство высокопрочного чугуна с шаровидным графитом осуществляется различными способами: путем сфероидизирующей обработки расплава магнием или магниесодержащими комплексными добавками в герметизированных автоклавах и ковшах, открытых ковшах, в потоке заливаемого расплава, в литейной форме и др. [4–8]. Существующие способы модифицирования имеют свои особенности, преимущества и недостатки.

Главной отличительной технологической особенностью способов является временной интервал между вводом модификатора в расплав чугуна и началом кристаллизации последнего, который определяется технологией модифицирования и разливки жидкого чугуна в литейные формы, а также существенно влияет на структуру, механические и эксплуатационные свойства высокопрочного чугуна в литом состоянии.

Целью данной работы было установление влияния времени выдержки расплава после сфероидизирующего модифицирования и до начала его кристаллизации в литейной форме с использованием различных способов модифицирования на микроструктуру и механические свойства высокопрочных чугунов фиксированного химического состава в литом состоянии.

Для исследований выбрали три способа модифицирования расплава чугуна, отличающиеся временным интервалом между вводом добавок в расплав и кристаллизацией чугуна – автоклавный метод (рис. 1, а), метод обработки в открытом ковше («Сэндвич-процесс») (рис. 1, б) и метод внутрiformенной обработки расплава («Инмолд-процесс») (рис. 1, в).

В автоклаве (рис. 1, а) при температуре 1420 ± 20 °С под избыточным давлением чугуны модифицировали металлическим магнием Mg90 в количестве 0,22...0,24 %. После сброса давления чугуны дополнительно модифицировали 1,2 % ферросилиция ФС75 и 0,2 % криолита марки КА (ГОСТ 10561-80). Взаимное перемешивание чугуна, модифицированного магнием, вместе с добавленным на зеркало ферросилицием и флюсом проводили при атмосферном давлении после повторного закрывания крышки автоклава. Формы заливали при температуре расплава чугуна 1380 ± 20 °С. Весь цикл обработки жидкого металла с момента добавления ферросилиция до заливки последней формы, включавший время перемешивания расплава, открытие крышки, извлечение ковша с расплавом из автоклава, снятие шлака, транспортировку и разливку чугуна по формам, составлял от 8 до 12 минут.

В открытом ковше емкостью 350 кг расплав чугуна модифицировали по «Сэндвич-процессу» (см. рис. 1, б) ферросилиций-магниевым сплавом ФСМг7 в количестве 2,0...2,2 %

от массы металла. Модификатор помещали в специальное углубление футеровки днища ковша, прикрывали чугуной пластиной толщиной 4...5 мм и, перед выпуском металла из печи, прогревали газовой горелкой до температуры 400...500 °С. Температура чугуна при заливке форм составляла 1380 ± 20 °С. На очистку модифицированного чугуна от шлака, транспортировку и разливку его по формам тратили от 4 до 6 минут.

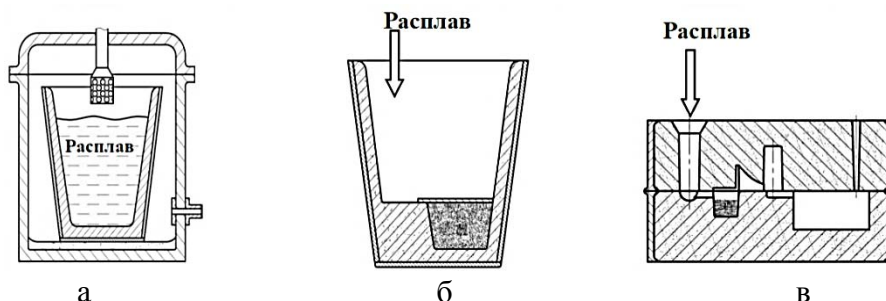


Рис. 1. Способы сфероидизирующего модифицирования расплава чугуна:

а – модифицирование в автоклаве; б – модифицирование в ковше (сэндвич-процесс); в – модифицирование в литейной форме (инмолд-процесс)

Сфероидизирующее модифицирование чугуна непосредственно в литейных формах («Инмолд-процесс») (см. рис. 1, в) выполняли сплавом ФСМг7. Измельченный модификатор помещали в специальную реакционную камеру, расположенную в литниковой системе на пути движения металла к полости формы. Температура исходного чугуна при заливке форм составляла 1420 ± 20 °С.

При модифицировании чугуна непосредственно в литейной форме временной интервал между вводом модификатора в расплав и началом кристаллизации чугуна сводился к нескольким десяткам секунд.

Микроструктуру чугунов определяли на образцах, изготовленных из ступенчатых проб с толщиной стенки от 5 до 50 мм, а механические испытания проводили на образцах, вырезанных из литых плит массой 10...12 кг с толщиной рабочей части 25 мм.

Определение механических характеристик чугунов в образцах на растяжение, ударный изгиб и твердость производили стандартными методами с использованием соответствующих приборов заводских лабораторий.

С накопленного массива данных для исследования отобрали результаты плавок исходного чугуна, а также чугунов практически идентичного химического состава после модифицирующей обработки, приведенного в табл. 1.

Микроструктуры модифицированных чугунов в различных сечениях стенок отливок (5 мм, 10 мм, 20 мм, 30 мм, 40 мм, 50 мм) показано на рис. 2.

Установлено, что в образцах в литом состоянии при одинаковом химическом составе в исследуемых сечениях стенок отливок микроструктура высокопрочного чугуна после модифицирования тремя технологическими процессами существенно отличается.

В образцах из чугуна, полученного модифицированием в литейной форме с толщиной стенки 5 мм, образуется структура, состоящая из включений графита правильной шаровидной формы ШГф5 в перлитно-ферритной металлической матрице (П85Ф15). Количество включений графита достигает $500...800 \text{ мм}^{-2}$ (см. рис. 2, I, а).

Микроструктура образцов с толщиной стенки 5 мм, полученных из чугунов, модифицированных в открытом ковше, а также в автоклаве, состояла из перлита, цементита и ледебурита с отдельными включениями графита шаровидной формы, характеризующихся баллом ШГф5. Однако, количество графитовых включений в двух последних случаях не превышает 125 мм^{-2} , так как основная часть углерода таких чугунов связана в игольчатый цементит ледебурита (см. рис. 2, II, III, а).

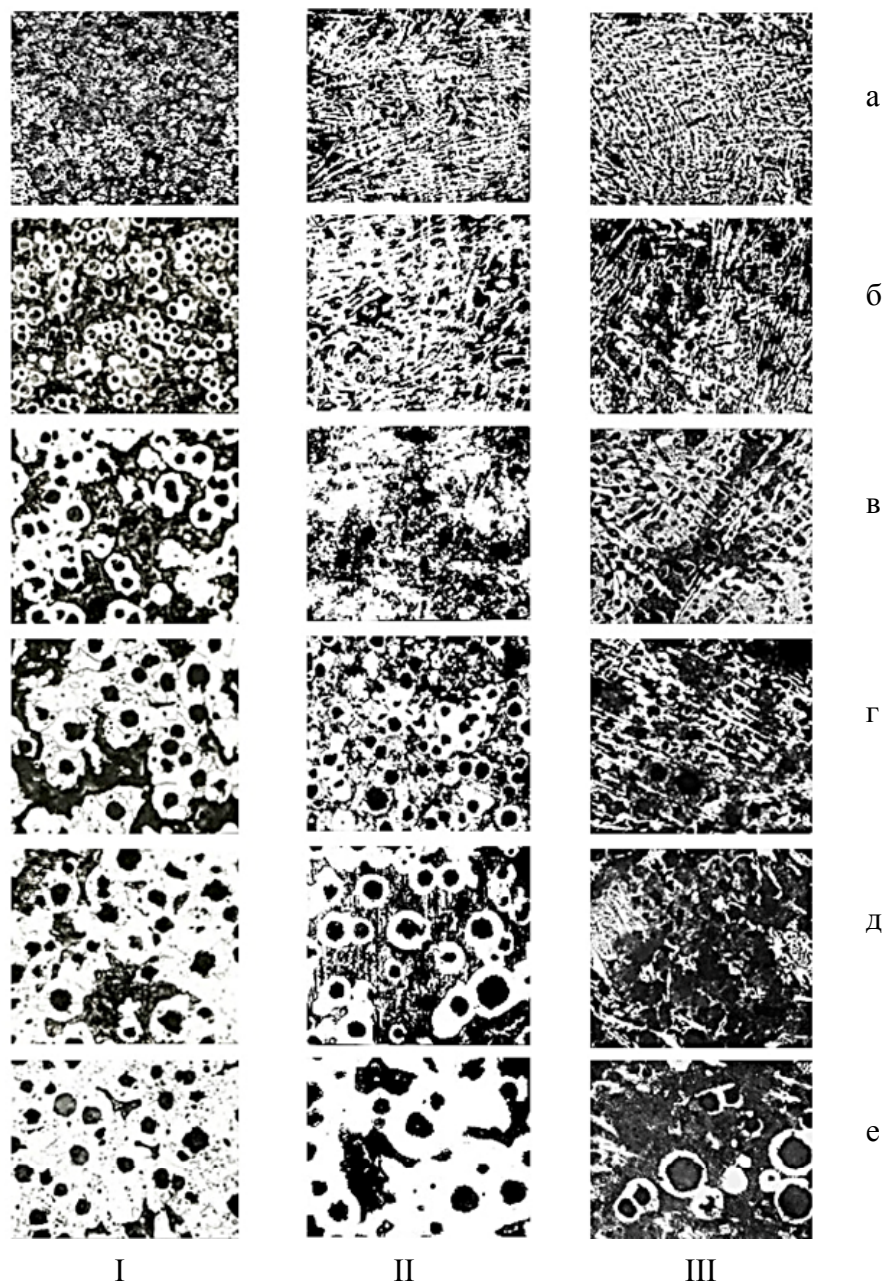


Рис. 2. Микроструктура чугуна ($\times 100$), модифицированного в литейной форме (I), открытом ковше (II), автоклаве (III) в образцах с различной толщиной сечения стенки: а – 5 мм; б – 10 мм; в – 20 мм; г – 30 мм; д – 40 мм; е – 50 мм

В образцах с толщиной сечения стенки 5 мм из чугунов, модифицированных в литейной форме, включения цементита и ледебурита не наблюдаются (см. рис. 2, I, а).

После модифицирования чугуна в литейной форме с увеличением толщины стенки отливки до 10...20 мм количество включений графита резко уменьшается до $200...280 \text{ мм}^{-2}$, а при дальнейшем увеличении толщины стенки образцов до 50 мм изменяется незначительно до $100...180 \text{ мм}^{-2}$ (см. рис. 2, I, б...е). При этом с уменьшением количества графитовых включений увеличивается их диаметр с ШГд25 до ШГд90...ШГд180 в исследуемых сечениях проб, что вызвано снижением скорости охлаждения.

Аналогичные результаты изменения количества и размеров графитовых включений наблюдаются и в образцах после модифицирования в ковше и в автоклаве. Однако в образцах из чугуна, модифицированного в ковше, наряду с графитовыми включениями наблюдается

и первичный цементит, который исчезает только в образцах диаметром более 20 мм (см. рис. 2, II, г–е). В чугунах, модифицированных в автоклаве, отдельные включения структурно-свободного цементита наблюдаются даже в образцах диаметром 50 мм (см. рис. 2, III, е).

При одинаковом размере образцов (например, при толщине от 20 до 50 мм) площадь микрошлифа, занятая ферритом, в чугунах, модифицированных в форме (см. рис. 2, I), больше (П20Ф80...П6Ф94), чем в чугунах, модифицированных в ковше (П45Ф55...П20Ф80) (см. рис. 2, II). Структура металлической матрицы чугуна, модифицированного в автоклаве, состояла преимущественно из перлита (П92Ф8) (см. рис. 2, III).

Таблица 1

Химический состав исходного и модифицированного чугунов

Объект анализа		Химический состав, %					
		C	Si	Mn	S	P	Mg
Исходный чугун		3,72 ± 0,08	2,16 ± 0,07	0,34 ± 0,02	0,029 ± 0,002	0,070 ± 0,002	–
Чугун после модифици- рования	в форме	3,63 ± 0,07	3,03 ± 0,05	0,34 ± 0,02	0,019 ± 0,002	0,070 ± 0,002	0,057 ± 0,008
	в ковше	3,59 ± 0,05	3,12 ± 0,07	0,34 ± 0,02	0,013 ± 0,002	0,070 ± 0,002	0,040 ± 0,006
	в автоклаве	3,60 ± 0,07	2,93 ± 0,05	0,34 ± 0,02	0,008 ± 0,002	0,070 ± 0,002	0,062 ± 0,008

Следовательно, в литом состоянии при одинаковом химическом составе в образцах исследуемых сечений склонность к графитизации при эвтектическом и эвтектоидном преобразовании, количество и дисперсность графита шаровидной формы, дисперсность эвтектического зерна в чугунах, модифицированных в литейной форме, выше, чем в чугунах, модифицированных в ковше, и значительно выше, чем в чугунах, модифицированных в автоклаве. При этом, чем больше скорость охлаждения (которая в данном случае, обеспечивается различной толщиной стенки литых проб), тем более существенное отличие между микроструктурами чугунов, модифицированных сравнительными технологическими процессами (см. рис. 2, I–III).

Выполненный металлографический анализ показывает, что технологический процесс внутриформенного модифицирования обеспечивает кристаллизацию отливок без отбела (приводящего к охрупчиванию чугуна и ухудшению обрабатываемости резанием) в тонких сечениях стенок более надежно и стабильно, по сравнению с технологическими процессами модифицирования чугуна в открытом ковше или в автоклаве.

Расхождение количественных параметров отдельных структурных составляющих в микроструктуре при одинаковом химическом составе и скорости охлаждения, определяет расхождение механических характеристик в литом состоянии чугунов, модифицированных тремя сравнительными технологическими процессами (табл. 2).

Установлено, что за счет меньшего количества перлитной составляющей в металлической матрице чугуна, модифицированный в литейной форме, имеет предел прочности на растяжение, предел текучести и твердость ниже, чем чугун, модифицированный в ковше и, особенно, в автоклаве (табл. 2).

В то же время, благодаря повышенной дисперсности графита и эвтектического зерна металлической матрицы, прочностные характеристики ферритного чугуна, модифицированного в литейной форме, стабилизируются на достаточно высоком уровне. Видно, что модифицированием в форме в литом состоянии получают чугун с пределом прочности на разрыв σ_b , более 500 МПа и относительным удлинением δ более 12 %.

Механические характеристики чугунов, модифицированных в автоклаве и в открытом ковше, в литом состоянии имеют некоторое несоответствие требованиям ДСТУ 3925-99. Поэтому для достижения необходимого сочетания прочности и пластичности в деталях из чугунов, получаемых путем модифицирования расплава в автоклаве и в ковше, в зависимости от требуемой марки, необходимо проводить дополнительную технологическую обработку расплава или термическую обработку отливок.

Таблица 2

Механические свойства чугунов, модифицированных в форме, ковше и автоклаве в литом состоянии

Свойство	Среднеарифметическое значение механических свойств чугуна, модифицированного		
	в форме	в ковше	в автоклаве
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	521 ± 20	557 ± 21	610 ± 23
Предел текучести σ_m , МПа	350 ± 30	402 ± 36	553 ± 62
Относительное удлинение δ , %	13,5 ± 1,5	6,8 ± 1,2	2,5 ± 0,8
Ударная вязкость K_{CS} , кДж/м ²	745 ± 40	355 ± 36	120 ± 28
Твердость, НВ	160-174	196-209	310-335

ВЫВОДЫ

Таким образом, методом модифицирования расплава в литейной форме при соблюдении оптимального состава исходного чугуна, а также его температуры заливки и скорости охлаждения, можно стабильно производить отливки из нескольких марок высокопрочного чугуна в общем технологическом потоке без дополнительного легирования и термической обработки.

Внутриформенное модифицирование по своему принципу сокращает к минимуму время между вводом модификатора в жидкий чугун и началом его кристаллизации, что обеспечивает максимальный эффект зародышеобразование и высокую степень графитизации и сфероидизации чугуна, измельчение зерна металлической матрицы и сфероидов графита, и способствует стабильному получению литых деталей с заданной структурой и свойствами. Кроме того, технология внутриформенного модифицирования упрощает и удешевляет процесс получения деталей за счет экономии модифицирующих добавок, исключает необходимость в установке в цехе дополнительного оборудования, а также улучшает условия труда в цехе.

Метод внутриформенного модифицирования может являться перспективным для внедрения на промышленных предприятиях с целью получения высококачественных чугунных изделий широкой номенклатуры в различных условиях производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шебашинов М. П. Высокопрочный чугун в автомобилестроении / М. П. Шебашинов, Ю. Е. Абраменко, Н. И. Бех. – М. : Машиностроение, 1988. – 216 с.
2. Olawale J. O. Processing Techniques and Productions of Ductile Iron: A Review / J. O. Olawale, S. A. Ibitoye, K. M. Oluwasegun // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2016. – Т. 7, № 9. – С. 397–423.
3. Лекаш С. Н. Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С. Н. Лекаш, Н. И. Бестужев. – Мн. : Наука і техника, 1992. – 269 с.
4. Бубликов В. Б. Влияние технологических факторов на формирование структуры тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием / В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, А. А. Ясинский, Б. Г. Зеленый, Л. Н. Сыропоршнев, Ю. Д. Бачинский, Л. А. Зеленая // Процессы Литья. – 2011. – № 3. – С. 34–44.
5. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60 / В. Б. Бубликов // Литейное производство. – 2008. – №11. – С. 2–8.
6. Ковалевич Е. В. Современные способы модифицирования для получения в чугуне шаровидного графита / Е. В. Ковалевич, Л. А. Петров, В. В. Андреев // Литейное производство. – 2014. – № 2. – С. 2–5.
7. Lerner Y. S. Overview of ductile iron methods / Y. S. Lerner // Foundry Trade Journal. – 2003. – V. 177. – P. 25–27.
8. Knustad O. Проблемы, возникающие при производстве высокопрочных чугунов. Обзор существующих способов получения ВЧ и используемых модификаторов / О. Knustad // Литейщик России. – 2011. – № 4. – С. 15–17.