

УДК 621.74

Фесенко М. А., Лукьяненко И. В., Фесенко Е. В., Косячков В. А.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ

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

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 магнийсодержащими комплексными добавками в герметизированных автоклавах и ковшах, открытых ковшах, в потоке заливаемого расплава, в литейной форме и др. [4–7]. Существующие способы модифицирования имеют свои особенности, преимущества и недостатки, а также рациональную область применения.

Главной отличительной технологической особенностью способов является временной интервал между вводом модификатора в расплав чугуна и началом кристаллизации последнего, который определяется технологией модифицирования и разлива 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 различных способов модифицирования на микроструктуру и механические свойства высокопрочных чугунов идентичного конечного химического состава в литом состоянии.

Для сравнительных 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).

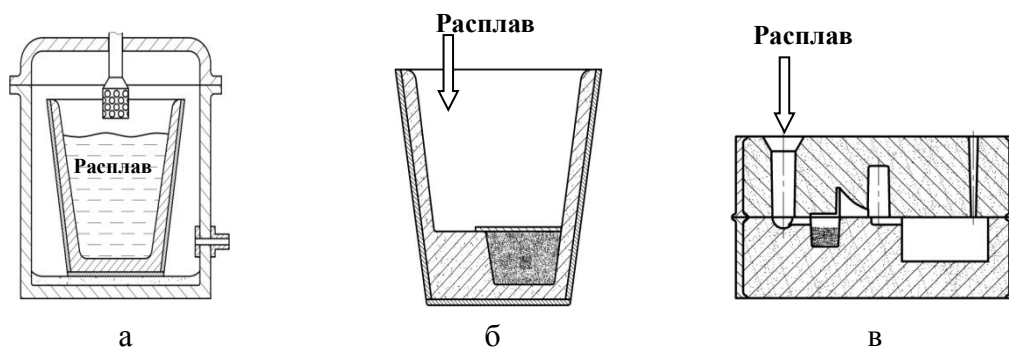


Рис. 1. Способы сфероидизирующего модифицирования расплава чугуна

В автоклаве марки КМ-2 (см. рис. 1, а) при температуре $1420 \pm 20^\circ\text{C}$ под избыточным давлением 6...7 кПа чугун модифицировали металлическим магнием Mg90 в количестве 0,22...0,24% масс. После сброса давления чугун 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 закрытия крышки автоклава пневматическим толкателем автоклава, который был соединен штангой с перфорированным графитовым испарителем. Формы заливали при температуре расплава чугуна $1380 \pm 20^\circ\text{C}$. 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 методом «Сэндвич-процесс» (см. рис. 1, б) ферросилиций-магниевым сплавом типа ФСМг7 в количестве 2,0...2,2% от массы металла. Модификатор с размером частиц 10...15 мм помещали в специальное углубление футеровки днища ковша, прикрывали чугунной пластиной толщиной 4...5 мм и, перед выпуском металла из печи, прогревали газовой горелкой до температуры 400...500°C. Температура чугуна при заливке форм составляла $1380 \pm 20^\circ\text{C}$. На очистку модифицированного чугуна от шлака, транспортировку и разливку его по формам тратили 4...6 минут.

Сфероидизирующее модифицирование чугуна непосредственно в литейных формах «Ин-молд-процесс» (см. рис. 1, в) выполняли сплавом ФСМг7 с размером частиц 1...5 мм. Модификатор помещали в специальную реакционную камеру, расположенную на пути движения металла к полости формы. Температура исходного чугуна при заливке форм составляла $1420 \pm 20^\circ\text{C}$.

При модифицировании чугуна непосредственно в литейной форме временной интервал между вводом добавок в расплав и началом кристаллизации чугуна сводился до нескольких десятков секунд не зависимо от того, какая из форм заливается первой, а какая последней.

Микроструктуру чугунов определяли на темплетях, 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 чугунов, модифицированных тремя сравнительными технологическими процессами в образцах, вырезанных из различных сечений стенок отливок (5 мм, 10 мм, 20 мм, 30 мм, 40 мм, 50 мм) иллюстрирует 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 $500...800 \text{ мм}^2$ (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 (рис. 2, II, III, а).

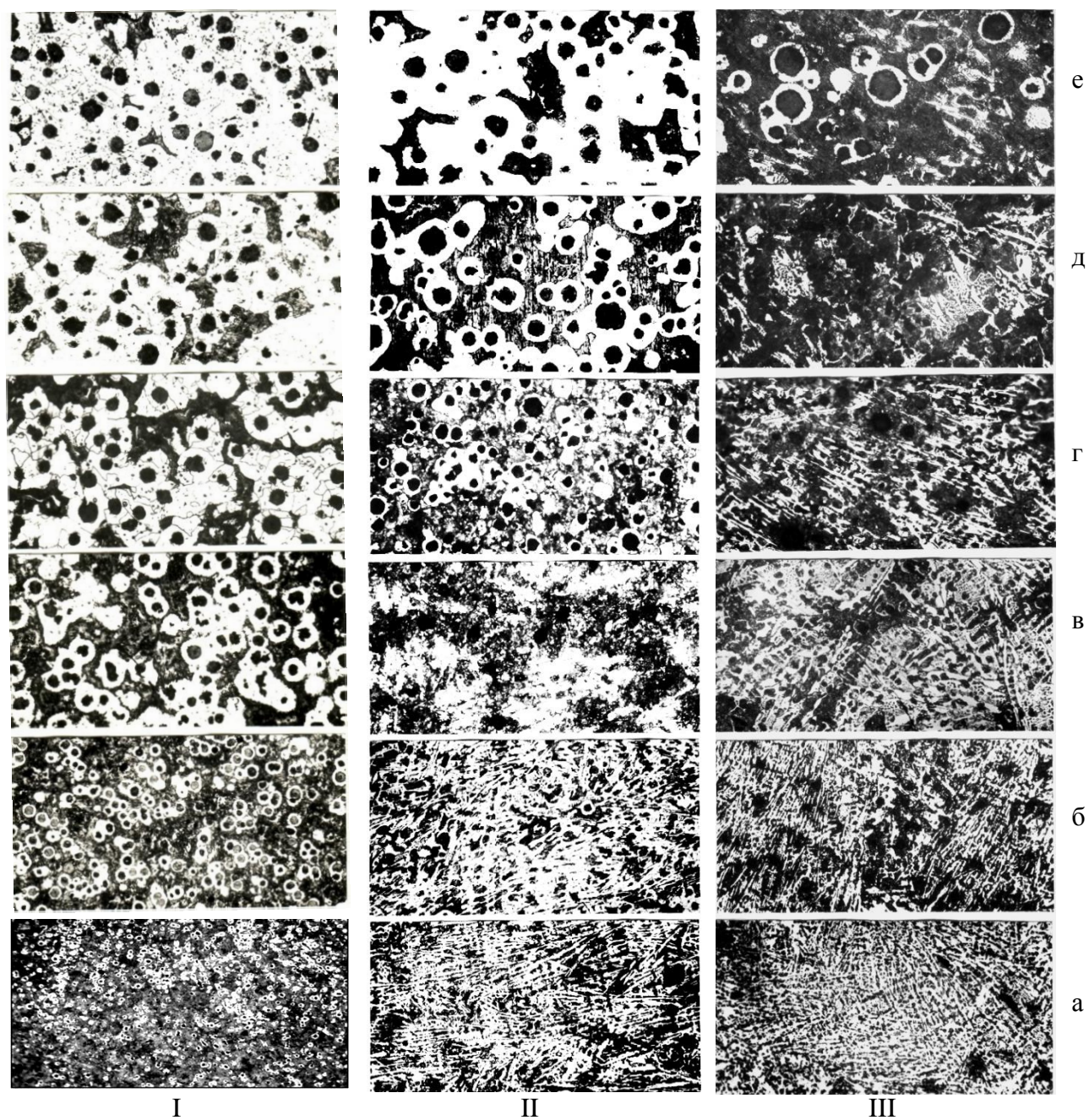


Рис. 2. Микроструктура чугуна ($\times 100$), модифицированно в литейной форме (I), открытом ковше (II), автоклаве (III) в образцах толщиной стенки 5 мм (а), 10 мм (б), 20 мм (в), 30 мм (г), 40 мм (д), 50 мм (е)

В образцах толщиной стенки 5 мм из чугунов, модифицированных в литейной форме, включения цементита и ледебурита не наблюдаются (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 $100...180 \text{ мм}^{-2}$ (рис.2, I, б...е). При этом с уменьшением количества графитовых включений увеличивается их диаметр с ШГд25 до ШГд90...ШГд180 в исследуемых сечениях проб. 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

(рис. 2, II, г...е). В чугунах, модифицированных в автоклаве, отдельные включения структурно-свободного цементита наблюдаются даже в образцах диаметром 50 мм (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 (рис. 2, I), больше (П20Ф80...П6Ф94), чем в чугунах, модифицированных в ковше (П45Ф55...П20Ф80) (рис. 2, II). Структура металлической матрицы чугуна, модифицированного в автоклаве состояла преимущественно из перлита (П92Ф8) (рис. 2, III).

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 (рис. 2, I...III).

Таблица 1

Химический состав исходного и модифицированного чугунов

Объект анализа		Химический состав, % масс.					Mg
		C	Si	Mn	S	P	
Исходный чугун		3,70 ±0,08	2,15 ±0,07	0,32 ±0,02	0,029 ±0,002	0,070 ±0,002	–
Чугун в отливках после модифицирования	в форме	3,64 ±0,06	3,06 ±0,05	0,32 ±0,02	0,018 ±0,002	0,070 ±0,002	0,058 ±0,008
	в ковше	3,58 ±0,04	3,18 ±0,07	0,32 ±0,02	0,012 ±0,002	0,070 ±0,002	0,042 ±0,004
	в автоклаве	3,62 ±0,08	2,92 ±0,07	0,32 ±0,02	0,008 ±0,002	0,070 ±0,002	0,062 ±0,008

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%. Такой чугун одновременно отвечает требованиям ДСТУ 3925-99 для промышленных марок ВЧ 420-12, ВЧ 450-10, ВЧ 450-5, ВЧ 500-7.

Таблица 2

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

Наименование механической характеристики	Среднеарифметическое значение и среднеквадратичное отклонение механических характеристик чугуна, модифицированного		
	в форме	в ковше	в автоклаве
Предел прочности при растяжении, σ_b , Мпа	513 ± 23	553 ± 24	603 ± 28
Предел текучести, σ_t , Мпа	342 ± 42	394 ± 31	548 ± 81
Относительное удлинение, δ , %	13,5 ± 3,1	7,0 ± 1,2	2,4 ± 0,6
Ударная вязкость, КС, кДж/м ²	750 ± 45	350 ± 80	120 ± 43
Твердость, НВ	156...170	197...207	302...321

Механические характеристики чугунов, модифицированных в автоклаве и в открытом ковше, в литом состоянии соответствуют требованиям ДСТУ3925-99 только лишь по одной из механических характеристик (по прочности или пластичности). 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 (модифицирование или легирование) или термическую обработку: отжиг на феррит или, наоборот, нормализацию.

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 чугуна и соответственно стабильное получение 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. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко [и др.] – Киев: Наук. думка, 1986. – 248 с.
3. Леках С. Н. Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С. Н. Леках, Н. И. Бестужев. – Мн.: Навука і техника, 1992. – 269 с.
4. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60 / В. Б. Бубликов // Литейное производство, 2008. – №11. – С. 2–8.
5. 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.
6. Lerner Y. S. Overview of ductile iron methods / Y. S. Lerner // Foundry Trade Journal, 2003. – V.177. – P.25–27.
7. 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.