

УДК 621.771:621.746

Р.А. Бикулов, В.И. Астащенко, М.С. Колесников, Т.В. Астащенко

**ВЛИЯНИЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ
АУСТЕНИТО-БЕЙНИТНЫХ ЧУГУНОВ**

Камская государственная инженерно-экономическая академия

Исследована и показана возможность применения низконикелевого и низкомагниевого модификаторов для получения высокопрочного чугуна. Механические свойства полученного чугуна находятся на высоком уровне.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, сфероидизирующие модификаторы, аустенизация, изотермическая закалка, закалочные среды, микроструктура металлической основы, графитовые включения, механические свойства.

Аустенито-бейнитные чугуны с шаровидным графитом обладают высоким комплексом механических и эксплуатационных свойств, что делает их перспективными для изготовления ответственных тяжело нагруженных деталей в автомобилестроении: шестерен, коленчатых валов, рычагов передней подвески и т.п. В работе обоснован выбор базового варианта технологического процесса изготовления отливок из высокопрочного чугуна, обеспечивающего получение без термической обработки ВЧШГ с $\sigma_b \geq 600$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 380$ МПа, $\delta \geq 10\%$, а после изотермической заковки – аустенито-бейнитного ВЧШГ с $\sigma_b \geq 900$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 520$ МПа, $\delta \geq 5\%$. Для решения поставленной задачи исследованы широко используемые отечественные сфероидизирующие модификаторы для ковшевого и внутриформенного модифицирования и вновь разработанные [1, 2].

Плавку чугуна проводили в индукционной тигельной печи повышенной частоты МГП-52 с основной футеровкой и использованием в шихте передельных чугунов, отходов углеродистой стали и ферросплавов.

На первом этапе исследований в качестве сфероидизирующих модификаторов использовали ЖКМК-4Р (49,6% Si, 9,5% Ca, 8,6% Mg, 4,7% РЗМ, Fe – ост.); медь – магниевую и никель-магний-цериевую лигатуру (90% Ni, 9% Mg, 1% Ce). В качестве флюса применили криолит К2 (ГОСТ 10561-73). Графитизирующее модифицирование осуществляли ФС-75 (ГОСТ 1415-78). Модификатор ЖКМК-4Р вводили в ковш с помощью «колокольчика», тяжелые лигатуры – на дно ковша.

Для получения аустенито-бейнитной структуры использовали двухступенчатую закалку:

- аустенитизация – нагрев образцов до 900°C в соляной ванне, выдержка 0,5 ч.; заготовки для оценки прокаливаемости выдерживались один час;
- изотермическая закалка в селитре в течении двух часов при температуре 300°C (режим 1), 350°C (режим 2) и 380 °C (режим 3), дальнейшее охлаждение на воздухе.

Химический состав исследованных чугунов: 3,45-3,65% С; 0,2-0,25% Mn; < 0,02% S; < 0,08% P.

Использовались различные варианты модифицирования: 2,5% ЖКМК-4 (1); 0,6% (Ni-Mg-Ce) + 0,6% (Cu-Mg) + 0,6% ФС75 (2); 1,1% (Ni-Mg-Ce) + 0,6% ФС75 (3); 1,2% (Cu-Mg) + 0,6% ФС75 (4).

При варианте 1 в чугуне содержалось 2,9-3,12% Si, в остальных вариантах – 2,4-2,6% Si. При варианте 2 в чугуне содержалось 0,48-0,52% Ni и 0,49-0,52% Cu, при варианте 3 – 0,85-0,93% Ni, при варианте 4 – 0,78-0,81% Ni.

С учетом выбранных отливок-представителей, в частности отливки «рычаг передней подвески» автомобиля КАМАЗ, требуемый уровень прокаливаемости (до 15 мм) обеспечивался введением в чугун до 0,5% Ni или 0,5% Cu. В нелегированных чугунах, модифицированных ЖКМК-4, обеспечивалась прокаливаемость до 10 мм. Предварительные эксперименты показали, что введение до 0,5% Mo несколько снижает прочность и, особенно, пластичность чугуна, обеспечивая в то же время сквозную прокаливаемость образцов толщиной до 30 мм.

Данные о механических свойствах полученных чугунов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства АБВЧШГ

Варианты модифицирования	Режим изотермической закалки	Механические свойства					
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	НВ	КС, Дж/см ²	
		МПа					
1	1	1390	1000	1220	2,8	401	79
	2			765	9,3	302	132
2	1	1330		1230	1,1	415	53
	2	930		755	5,4	338	83
3	1	1350		1230	1,2	388	71
	2	930		745	7,2	311	99
4	1	1420		1270	2,1	415	71
	2	975		760	7,9	331	93

Учитывая, что применение Ni-Mg-Ce лигатуры позволяет получить достаточно высокие свойства чугуна как в литом, так и в изотермическом закаленном состояниях, а также ее широкое применение на заводах, нами исследована возможность использования низкомагнетной (до 5% Mg) и низконикелевой (до 30% Ni) лигатуры, отличающейся высокой технологичностью при ковшевом модифицировании, сравнительной дешевизной и возможностью ее изготовления непосредственно в литейных цехах.

Проведенные исследования позволили оптимизировать состав модификатора и отработать технологию его получения и измельчения.

При получении лигатуры использовались две плавильные печи, процесс смешения расплавов и получение низконикелевой Fe-Ni-Mg-Ce лигатуры осуществлялся под слоем флюса, церий вводился в виде МЦ-40. По одному варианту лигатура разливалась в водоохлаждаемые изложницы. Полученные слитки дробились с использованием вибрационной щековой дробилки марки 150 ДР и мельницы КИД60, что позволило получить фракцию менее 1,0 мм. В результате дополнительных экспериментальных работ нами была также получена лигатура в виде порошка на установке УРС40-1, которая используется обычно для получения металлических порошков распылением расплава в струе газа. Полученный порошок с фракцией 0,2-0,4 мм отличается стабильностью химического состава, удобен для автоматизированного процесса дозирования и расфасовки. Использование лигатуры в виде порошка повышенной дисперсности при обработке чугуна в ковшах до 70 кг показало ее высокую технологичность, отсутствие пироэффекта и дымовыделения, высокое усвоение и обеспечивает (при остаточном содержании Ni в чугуне = 0,51%) без термообработки $\sigma_B = 605$ МПа, $\sigma_{0,2} = 385$ МПа и $\delta = 10,2\%$, а после термообработки (режим 1/ режим 2) $\sigma_B = 1390/1120$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1180/905$ МПа и $\delta = 2,6/5,5\%$.

При внутрiformенном модифицировании использовалась лигатура ФСМг5 (ТУ-14-5-134-86). Конструкция и методика расчета литниковой системы были, как и на ОАО «КАМАЗ», но с установкой фильтра типа Sedex.

В чугунах, содержащих 3,48% С, 2,5% Si, 0,16% Mn, 0,2% Ni, 0,58% Cu, 0,015% S, 0,038% P и 0,06% Cr, при введении 1,5% ФСМг5 были обеспечены свойства:

- без термообработки $\sigma_B = 605$ МПа, $\sigma_{0,2} = 400$ МПа, $\delta = 10,4\%$ и 230НВ;
- после изотермической закалки (режим 3) $\sigma_B = 1020$ МПа, $\sigma_{0,2} = 760$ МПа, $\delta = 5,6\%$ и 325 НВ.

В чугунах, содержащих 3,37% С, 2,67% Si, 0,12% Mn, 0,64% Cu, 0,034% S, 0,047% P и 0,04% Cr, были обеспечены свойства:

- без термообработки $\sigma_B = 650$ МПа, $\sigma_{0,2} = 420$ МПа, $\delta = 7,3\%$ и 235 НВ;
- после изотермической закалки (режим1/режим2) $\sigma_B = 1470/1140$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1150/770$ МПа, $\delta = 3,0/9,7\%$ и 415НВ/330НВ.

Полученные результаты работы свидетельствуют о том, что с использованием отечественных шихтовых материалов и предложенных низконикелевых и низкомагниевого модификаторов возможно получение отливок из ВЧШГ, которые обеспечивают для деталей автомобилестроения из чугуна требуемые свойства как в литом, так и в термообработанном состояниях.

Во второй части работы исследовано влияние легирования чугуна никелем и медью, которые (по имеющимся данным) увеличивают прокаливаемость и повышают прочность чугуна. Нами была проведена серия экспериментов, в которых никель и медь вводились отдельно и совместно. Химический состав, прокаливаемость, механические свойства базовых чугунов, используемых на ОАО «КАМАЗ», в исходном и закаленном состояниях приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Характеристика химического состава и структуры АБВЧШГ^{1*}

Плавка	Химический состав (мас., %)						Структура графита		Количество феррита в металлической основе в литом состоянии
	C	Si	Mn	Ni	Cu	Mo	K_ϕ	d_r	
1	3,57	2,61	0,26	0,23	0,57	-	0,94	43	Ф65
2	3,45	2,71	0,25	0,05	0,65	-	0,93	38	Ф40
3	3,64	2,64	0,27	0,90	-	-	0,93	36	Ф55
4	3,57	2,68	0,27	0,57	0,49	-	0,90	51	Ф35
5	3,56	2,51	0,27	-	0,94	-	0,91	38	Ф30
6	3,52	2,57	0,28	1,93	-	-	0,94	41	Ф15
7	3,23	2,26	0,51	0,35	1,00	0,30	0,92	48	Ф5

* АБВЧШГ – аустенито-бейнитный высокопрочный чугун с шаровидным графитом; K_ϕ – коэффициент формы графита; d_r – средний размер графитовых включений (мкм).

Из каждой плавки определялись механические свойства ВЧШГ на образцах, вырезанных из стандартных клиньев: в литом состоянии (по 3 образца от каждой плавки) и после изотермической закалки (по 3 образца на каждый режим термической обработки).

Исследования структуры на микроскопе NEOFOT-21 проводили на шлифах, вырезанных из образцов клиновидных заготовок и головок образцов после механических испытаний. Механические испытания при статических нагрузках проводили на универсальной разрывной машине ZD-20. Ударную вязкость определяли по ГОСТ 9454-78 на образцах размером 10×10×55 мм без надреза на маятниковом копре МК-10.

Во всех случаях после закалки структура чугуна состояла из бейнита и остаточного аустенита. Видно, что изотермическая закалка чугуна базового состава (табл. 3), легированного

в различном соотношении медью и никелем, обеспечивает возможность варьировать в широких пределах прочностью (905-1450 МПа) и пластичностью (1,3-9,8%). При этом прокаливаемость изменяется в пределах от 7,5 до 17 мм. Дополнительное легирование чугуна молибденом (0,3%) несколько снижает пластичность, но увеличивает прокаливаемость до 32-38 мм.

Таблица 3

**Влияние параметров термической обработки на механические свойства
и прокаливаемость АБВЧШГ**

Плав-ка	Параметры термообработки				Механические свойства				Прокаливаемость, мм
	аустенитизация		изотермическая закалка		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ	
	$T, ^\circ\text{C}$	τ , мин	$T, ^\circ\text{C}$	τ , мин					
1	-	-	-	-	530	420	11,8	190	-
1	900	30	300	30	1400	1230	1,6	400	12,0
1	900	30	380	30	1000	750	5,4	295	9,0
2	-	-	-	-	560	440	6,7	200	-
2	900	30	300	30	1450	1120	2,1	406	10,0
2	900	30	380	30	1140	730	8,9	298	8,0
3	-	-	-	-	520	410	7,4	196	-
3	900	30	300	30	1350	1220	1,3	386	10,8
3	900	30	380	30	905	715	7,9	290	7,5
4	-	-	-	-	550	445	6,3	202	-
4	900	30	300	30	1330	1120	1,2	405	12,0
4	900	30	380	30	915	730	6,1	305	9,0
5	-	-	-	-	580	410	5,8	206	-
5	900	30	300	30	1400	1220	2,0	418	13,0
5	900	30	380	30	960	735	8,3	300	9,0
6	-	-	-	-	680	560	2,8	226	-
6	900	30	300	30	1350	1140	5,1	380	17,0
6	900	30	380	30	950	685	9,8	275	12,0
7	-	-	-	-	750	550	1,5	242	-
7	900	30	300	30	1500	1250	1,2	415	38,0
7	900	30	380	30	1015	770	3,8	320	32,0

Выводы

1. Показана возможность использования низконикелевых и низкомагниевого модификаторов для получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.
2. Благодаря изотермической закалке чугуна в горячем расплаве соли можно повысить прочностные показатели сплава при сохранении на высоком уровне его пластичных свойств.
3. Легирование чугуна медью и никелем позволяет достичь прокаливаемости на уровне 7,5 – 17,0 мм и получить на ВЧШГ высокую прочность как в литом ($\sigma_B > 520$ МПа), так и термообработанном ($\sigma_B > 905$ МПа) состоянии. Дополнительное введение молибдена в чугун существенно повышает его прокаливаемость, но несколько снижает (до 3,8%) пластичность. Достижимый уровень свойств указывает на возможность применения чугуна для автомобильных отливок ответственного назначения.

Библиографический список

1. Производство чугунов многоцелевого назначения: разработка составов и управление технологическими процессами / Р.А. Бикулов [и др.]. – М.: Academia, 2009. – 351 с.
2. **Корниенко, Э.Н.** Разработка высокопрочных чугунов с повышенными специальными свойствами / Э.Н. Корниенко, М.С. Колесников. – Наб. Челны: Изд-во Камского политехн. ин-та, 1999. – 169 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

R.A. Bikulov, V.I. Astachenko, M.S. Kolesnikov, T.V. Fstaschenko

INFLUENCE OF SPHEROIDIZING MODIFICATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THERMALLY TREATED AUSTENITE AND BAINITE CAST IRON

The possibility of applying low nickel and low magnesium modifiers for high-test cast iron producing is shown. Mechanical properties of the derived cast iron are on a high level.

Cast iron alloying by nickel, copper and molybdenum and also isothermal annealing promotes hardening and harden ability of alloy.

Key words: High-test cast iron, spheroidizing modifiers, austenite process, isothermal annealing, quenching circumstances, microstructure of metal foundation, graphite inclusions, mechanical properties.