

Д. А. Болдырев (Исследовательский центр ОАО «АВТОВАЗ»), С. В. Давыдов (Брянский государственный технический университет), И. В. Рябчиков (ООО «Компания НПП, г. Челябинск»), Р. Г. Усманов (ООО «Компания НПП, г. Челябинск»)

Исследование эффективности высокобаристого ферросилиция на ранней и поздней стадии графитизирующей обработки высокопрочного чугуна

Литейный ферросилиций получил мировое признание как материал, обеспечивающий экономичное графитизирующее модифицирование серых и высокопрочных чугунов. Литейный 75%-ный ферросилиций содержит от 0,3 до 1,0% кальция – элемента, уменьшающего количество структурно-свободных карбидов, что способствует улучшению обрабатываемости резанием чугуновых отливок. Содержание в ферросилиции других активных элементов, таких, как барий, цирконий, РЗМ чрезвычайно мало, в результате чего эффект модифицирования проявляется недостаточно эффективно. Поэтому для полноценного модифицирования расплава чугуна необходимо существенно увеличивать расход модификатора.

Новые типы графитизирующих модификаторов уже содержат в своем составе необходимое количество активных щелочно- или редкоземельных металлов [1]. Это позволяет получать требуемые характеристики структуры и свойств чугуна в отливках, используя меньшее количество модификатора. Наиболее эффективные модификаторы минимизируют степень переохлаждения чугуна в процессе затвердевания отливок как в тонких сечениях, так и в сечениях средней толщины. Однако длительность эффекта модифицирования при работе любых модифицирующих материалов не может быть стабильной во времени. При длительной выдержке модифицированного чугуна перед заливкой модификаторы теряют свою способность создавать центры зародышеобразования (ЦЗ) графита и снижать отбел [2]. Малая длительность эффекта модифицирования расплава чугуна объясняется как общим ростом размера неметаллических включений – продуктов реакции модификатора с расплавом в процессе его выдержки, так и их растворением, что снижает общее число эффективных ЦЗ графита в процессе кристаллизации. Потеря способности формирования ЦЗ связана также с всплыванием и переходом гетерогенных зародышей в шлак. Следовательно, размер ЦЗ не должен превышать определенного критического значения, свыше которого включение всплывает и переходит в шлак. По закону Стокса главной движущей силой, определяющей скорость всплывания (флотации) частиц, являющиеся их размер:

$$v = \frac{d^2(\rho_a - \rho)g}{18\mu}, \quad (1)$$

где v – скорость всплывания (флотации), м/с; d – диаметр всплывающего ЦЗ, м; ρ_a – удельная плотность жидкого чугуна, кг/м³; ρ – удельная плотность всплывающего ЦЗ, кг/м³; g – гравитационная постоянная, 9,81 м/с²; μ – вязкость жидкого чугуна, кг/с·м.

С другой стороны, удержание ЦЗ в толще расплава осуществляется за счет энергии сил межфазного натяжения на границе «расплав – включение». Следовательно, не превышая определенный критический размер, ЦЗ могут оставаться в расплаве, то есть скорость их всплывания (флотации) равна нулю, и ЦЗ находятся в объеме расплава чугуна в виде «взвеси». Размер ЦЗ, остающегося в объеме расплава, не должен превышать значения, определяемого из следующего неравенства:

$$d < \frac{\sigma \cos \theta}{p}, \quad (2)$$

где d – диаметр ЦЗ, м; σ – поверхностное натяжение на границе «расплав – ЦЗ», кг/м; θ – краевой угол смачивания, град; p – внешнее давление, Па.

Таким образом, эффективность модифицирования можно определить через создание в расплаве «взвеси» ЦЗ с диаметром каждой частицы, соответствующим выражению (2), при условии, что время ошлаковывания растущих ЦЗ, определяемое через выражение (1), должно заметно превышать технологически требуемую длительность эффекта модифицирования. Следовательно, эффективность модифицирования в практическом плане может выражаться через раннее или позднее модифицирование. Если процесс модифицирования обеспечивает выполнение выражения (2), то модификатор можно вводить на ранней стадии (модифицирование в ковше), то есть в этом случае ЦЗ не только сохраняются в расплаве, но и до момента начала кристаллизации вырастают до сверхкритического размера без ошлаковывания. Если в процессе модифицирования образующиеся неметаллические включения интенсивно выводятся из расплава, не вызывая инокулирующего эффекта, то есть диаметр получаемых ЦЗ превышает величину $\sigma \cos \theta / p$ в выражении (2) и в этом случае реализуются условия выполнения выражения (1), то целесообразнее вводить модификатор на поздней стадии обработки расплава (ввод модификатора в литниковую чашу или в форму).

Таким образом, целью настоящей работы является решение практической задачи определения предпочтительности той или иной схемы модифицирования с точки зрения наилучшего сохранения ЦЗ графита.

Из всех химических элементов, вводимых в модификаторы для повышения их эффективности, осо-

Таблица 1. Химический состав модификатора Sibar®22, %

Диапазон	Si	Ba	Ca	Al	Fe
		45–60	20–25	max 3,0	max 3,0
В крупке, фракция 1–5 мм					
Факт	53,1	29,4	–	1,3	ост.
В куске, фракция 150–200 г					
Факт	55,5	24,6	1,9	1,8	ост.

бое внимание следует обратить на барий. Барий по термодинамическим свойствам близок к кальцию. Их раскисляющая и десульфуризирующая способность при температуре модифицирования чугуна практически одинакова. Однако барий экономически более выгоден по сравнению с кальцием и существенно эффективнее, чем кальций и стронций [2].

Согласно [3], с увеличением в модификаторе содержания бария при постоянном содержании других элементов форма графитных включений улучшается, увеличивается их количество, уменьшаются размеры,

то есть проявляется достаточно устойчивый модифицирующий эффект.

Для подробного изучения эффективности влияния бария как активной добавки в модификаторе на основе ферросилиция на ранней стадии графитизирующей обработки – в заливочном ковше, на поздней – в заливочной чаше формы, были проведены испытания модификатора Sibar®22 (ООО «Компания НПП», г. Челябинск) в крупке 1–5 мм и куске 150–200 г (табл. 1).

Для достижения указанной цели в работе решали следующие задачи:

Таблица 2. Расход модификатора Sibar®22 при раннем (ковшовом) модифицировании и твердость по Бринеллю материала опытных отливок

Деталь/Марка чугуна	Расход Sibar®22, кг/ковш	Диапазон НВ	НВ по НД
Вал коленчатый 2103, 11183, 2110/Gh75–50–03	1,5	255	250–302 *
Вал коленчатый 21213/Gh75–50–03	3,5	269–292	
Валик привода масляного насоса 2101/Gh65–48–05	3,5	241–249	190–280
Маховик 2108, 2110/Gh56–40–05	3,5	182–211	180–250
Суппорт переднего тормоза 2101/Gh56–40–05	7	197–202	
Суппорт переднего тормоза 2108/Gh56–40–05	3,5	200–207	
Суппорт переднего тормоза 2110/Gh56–40–05			
Суппорт переднего тормоза 2121/Gh56–40–05	5,5	207–211	
Коробка дифференциала 2108/ Gh56–40–05	4	182–193	
Коллектор выпускной 2108/ Gh56–40–05	5	187–197	
Ступица заднего колеса 2110/ Gh56–40–05	5	217–229	
Коллектор выпускной 2123/ЧВГ40	3	197	
Картер редуктора заднего моста 2101/ВЧ50	7	179	
Ступица переднего колеса 2101/ВЧ50	5,35	219–229	170–210**

* Твердость в нормализованном состоянии.

** Твердость в отожженном состоянии.

Примечание: Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9013–59) измеряли на твердомере ТБ 5006.

1. Снизить расход графитизирующего модификатора Sibar®22 фракции 1–5 мм по сравнению с модификатором ФС75л6 фракции 3,2–10 мм для первичной ковшовой обработки расплава высокопрочного чугуна.
2. Снизить расход графитизирующего модификатора ФС75л6 фракции 3,2–10 мм при использовании для поздней обработки вместо куска ФС75л3 модификатора Sibar®22л3 кусковой фракции 150–200 г.
3. Разработать методики оценки эффективности использования альтернативного модификатора дробленой и кусковой фракции для графитизирующей обработки расплава высокопрочного чугуна на ранней (в ковше) и поздней (в заливочной чаше формы) стадии для ускорения и упрощения процедуры принятия решения о целесообразности его применения взамен существующего.

Серийная технология получения отливок из высокопрочного чугуна состоит из проводимого совместно раннего графитизирующего модифицирования ФС75л6 фракции 3,2–10 мм и сфероидизирующего модифицирования Ni–Mg–Ce–лигатурой в ковше и позднего (вторичного) графитизирующего модифицирования кусковым ФС75л3 массой 150–200 г в заливочной чаше формы.

Объектами исследования являлись отливки деталей из высокопрочного чугуна марок ЧВГ40, ВЧ50, Gh56–40–05, Gh65–48–05 и Gh75–50–03. Металлоемкость заливочного ковша – 1,2 т.

Апробация нового графитизирующего модификатора для раннего (ковшового) модифицирования расплава высокопрочного чугуна проводилась на указанной в табл. 2 номенклатуре отливок.

Исследование эффективности раннего (ковшового) графитизирующего модифицирования высокопрочного чугуна модификатором Sibar®22 дробленой фракции проводили размещением его навески вместе с Ni–Mg–Ce–лигатурой на днище ковша перед заполнением жидким чугуном из печи ожидания. Позднее (вторичное) модифицирование чугуна производили в заливочной чаше каждой формы кусковым ФС75л3 массой 150–200 г.

Отливки для исследований отбирались из первой и последней форм с разливаемого ковша. Действие модификатора оценивали путем анализа твердости по Бринеллю опытных отливок.

Ковшовый расход Sibar®22 и данные по твердости чугуна в отливках приведены в табл. 2. Анализ микроструктуры опытных отливок приведен в табл. 3. Нормы расхода модификаторов, используемых в серийной (ФС75л6) и опытной (Sibar®22) технологиях, а также программа производства всей номенклатуры отливок деталей из высокопрочного чугуна, получаемых ковшовым модифицированием, на 2007 г. приведены в табл. 4.

Согласно данным табл. 4, вопрос о целесообразности применения модификатора Sibar®22 взамен ФС75л6 может быть разрешен, исходя из следующего неравенства:

$$C_M(\text{Sibar}^{\circledast}22) < k \cdot C_M(\text{ФС75л6}), \quad (3)$$

где $C_M(\text{Sibar}^{\circledast}22)$, $C_M(\text{ФС75л6})$ – стоимости опытного (Sibar®22) и серийно применяемого (ФС75л6) модификаторов, руб./т;

k – коэффициент разницы расхода серийного и опытного модификаторов:

$$k = \frac{P_{\Sigma}(\text{ФС75л6})}{P_{\Sigma}(\text{Sibar}^{\circledast}22)} = \frac{586}{240,2} = 2,44, \quad (4)$$

Таким образом, зная стоимость серийного материала ФС75л6 и коэффициент разницы расхода серийного и опытного модификаторов (согласно данным табл. 4) данное неравенство позволяет определить максимальную экономически целесообразную стоимость опытного модификатора Sibar®22.

В общем виде данное неравенство может быть записано следующим образом:

$$C_M(\beta) < C_M(\alpha) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{K_i} \cdot P(\alpha)_i^K}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{K_i} \cdot P(\beta)_i^K}, \quad (5)$$

где $C_M(\beta)$, $C_M(\alpha)$ – стоимости опытного (β) и серийно применяемого (α) модификаторов, руб./т; K_i – коэффициент емкости ковша, используемого для заливки i -й отливки; P_i – годовая программа производства i -й отливки, т; $P(\alpha)_i^K$ – ковшовая норма расхода на ковш серийного модификатора α для заливки i -й отливки, т; $P(\beta)_i^K$ – ковшовая норма расхода на ковш опытного модификатора $P(\alpha)_i^K$ для заливки i -й отливки, т.

Как видно из табл. 4, модификатор Sibar®22 обеспечивает получение требуемого качества чугуна в отливках при снижении норм расхода в 1,5–4 раза по сравнению с ФС75л6 в зависимости от конкретной отливки.

Апробация нового графитизирующего модификатора для позднего (вторичного) модифицирования расплава высокопрочного чугуна в заливочной чаше формы проводилась на указанной в табл. 5 номенклатуре отливок.

При исследовании эффективности позднего (вторичного) графитизирующего модифицирования высокопрочного чугуна модификатор Sibar®22л3 кусковой фракции массой 150–200 г размещали в заливочной чаше формы. Ковшовую графитизирующую обработку расплава чугуна (раннее модифицирование) проводили размещая навеску модификатора ФС75л6 вместе с Ni–Mg–Ce–лигатурой на днище ковша перед его заполнением жидким чугуном из печи ожидания.

Эффективность модифицирования оценивали, анализируя твердость по Бринеллю и микроструктуру опытных отливок. Отливки для исследований отбирались из первой и последней форм с разливаемого ковша.

Ковшовый расход ФС75л6 и данные по твердости чугуна в отливках приведены в табл. 5. Параметры микроструктуры опытных отливок представлены в табл. 6. Нормы расхода модификатора ФС75л6, используемого в серийной и опытной технологиях, а также программа производства всей номенклатуры отливок деталей

Таблица 3. Параметры микроструктуры чугуна опытных отливок при раннем (ковшовом) модифицировании опытным модификатором Sibar®22

Деталь/Марка чугуна	Микроструктура			
	Форма, распределение и размеры графитовых включений	Металлическая основа	По НД	
Вал коленчатый 2103/ Gh75-50-03	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5; ССГ – 90%	перлит пластинчатый, феррит 20%	Графит шаровидный, ССГ ≥ 90%; перлит пластинчатый, феррита – до 8% (после нормализации), цементита ≤ 1%	
		перлит пластинчатый, феррит 30%		
Вал коленчатый 21213/ Gh75-50-03	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ – 90%	перлит пластинчатый, феррит 3-5%		
		перлит пластинчатый, феррит 3-10%		
Валик привода масляного насоса 2101/ Gh65-48-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ – 90%	перлитно-ферритная (70x30)		Графит шаровидный, ССГ ≥ 90%; перлит пластинчатый, феррит, цементита ≤ 5%
		перлитно-ферритная (60x40)		
Маховик 2108/ Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ – 90%	перлитно-ферритная (50x50)		
		перлитно-ферритная (60x40)		
Суппорт переднего тормоза 2101-3511017/ Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ – 90%	ферритно-перлитная (50x50)		
		ферритно-перлитная (70x30)		
Суппорт переднего тормоза 2108/ Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ – 90%	перлитно-ферритная (85x15)		
		перлитно-ферритная (70x30)		
Суппорт переднего тормоза 2121/ Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ – 90%	ферритно-перлитная (60x40)		
		перлитно-ферритная (50x50)		
Коробка дифференциала 2108/ Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ – 90%	ферритно-перлитная (50x50)		
		ферритно-перлитная (60x40)		
Коллектор выпускной 2108/ Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ – 90%	перлитно-ферритная (60x40)		
		перлитно-ферритная (50x50)		
Ступица заднего колеса 2110/ Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ – 90%	перлитно-ферритная (50x50)		
Коллектор выпускной 2123-1008025/ ЧВГ40	Графит вермикулярный – ВГф2, ВГф3, шаровидный – ШГФ4, ШГФ5	перлитно-ферритная (55x45)	Графит вермикулярный – ВГф2, ВГф3, шаровидный – ШГФ4, ШГФ5; перлит пластинчатый, феррит, цементита ≤ 5%	
Картер редуктора заднего моста 2101-2402018/ ВЧ50	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5; ССГ – 90%	ферритно-перлитная (60x40)	Графит шаровидный, ССГ ≥ 80%; перлит пластинчатый, феррит, цементита ≤ 5%	
		ферритно-перлитная (70x30)		
Ступица переднего колеса 2101-3103015/ ВЧ50	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ – 90%	перлитно-ферритная (65x35)		
		перлитно-ферритная (60x40)		

Примечание. Металлографический анализ выполнен на металлографическом микроскопе UNIMET 8585 фирмы Бюллер.

Таблица 4. Программа производства отливок деталей из высокопрочного чугуна и нормы расхода модификаторов при работе по серийной (ФС75л6) и опытной (Sibar®22) технологиям

Деталь/Марка чугуна	Программа на 2007 г.		Расход ФС75л6 по серийной технологии		Расход Sibar®22 по опытной технологии	
	в тоннах	в ковшах	на ковш, кг	на программу, т	на ковш, кг	на программу, т
Вал коленчатый 2103, 11183, 2110/Gh75-50-03	24522,41	20436	3	61,31	1	20,44
Вал коленчатый 21213/Gh75-50-03	1690,41	1409	6	8,45	4	5,64
Валик привода масляного насоса 2101/Gh65-48-05	1674,54	1396	8	11,17	3,5	4,89
Маховик 2108, 2110/Gh56-40-05	12779,01	10650	7	74,55	2,5	26,63
Суппорт переднего тормоза 2101/Gh56-40-05	7435,19	6196	13	80,55	6,5	40,27
Суппорт переднего тормоза 2108/Gh56-40-05	2458,34	2049	8	16,39	3	6,15
Суппорт переднего тормоза 2110/Gh56-40-05	3417,80	2849	8	22,79	3	8,55
Суппорт переднего тормоза 2121/Gh56-40-05	2304,66	1921	12	23,05	5	9,61
Коробка дифференциала 2108/Gh56-40-05	6776,48	5648	12	67,78	3	16,94
Коллектор выпускной 2108/Gh56-40-05	4809,47	4008	11	44,09	4,5	18,04
Ступица заднего колеса 2110/Gh56-40-05	6543,22	5453	12	65,44	5	27,27
Коллектор выпускной 2123/ЧВГ40	3858,17	3216	7	22,51	2,5	8,04
Картер редуктора заднего моста 2101/ВЧ50	5195,28	4330	12	51,96	6,5	28,15
Ступица переднего колеса 2101/ВЧ50	3918,65	3266	11	35,93	6	19,60
Всего	87383,63	72820		586		240,2

из высокопрочного чугуна на 2007 г. приведены в табл. 7.

Согласно данным табл. 7, вопрос о целесообразности применения модификатора Sibar®22 взамен ФС75л6 может быть разрешен, исходя из следующего неравенства:

$$C_M(\text{Sibar}^{\circledR}22) < C_M(\text{ФС75л3}) + k \cdot C_M(\text{ФС75л6}),$$

или

$$C_M(\text{Sibar}^{\circledR}22) < C_M(\text{БрФС65Ба1}) + k \cdot C_M(\text{ФС75л6}), \quad (6)$$

где $C_M(\text{Sibar}^{\circledR}22)$, $C_M(\text{ФС75л3})$, $C_M(\text{БрФС65Ба1})$ и $C_M(\text{ФС75л6})$ – стоимости опытного (Sibar®22) и серий-

но применяемых (ФС75л3, ФС75л6, БрФС65Ба1) модификаторов, руб./т;

k – коэффициент различия расхода серийных и опытного модификаторов:

$$k = \frac{P_{\Sigma}(\text{ФС75л6}_{\text{сер}}) - P_{\Sigma}(\text{ФС75л6}_{\text{он}})}{P_{\Sigma}(\text{Sibar}22)} = \frac{585,97 - 239,11}{218,31} = 1,59, \quad (7)$$

Таким образом, зная стоимость серийных мате-

Таблица 5. Ковшовый расход модификатора FC75л6 при позднем (вторичном) модифицировании кусковым Sibar®22л3 и твердость по Бринеллю материала опытных отливок

Деталь/Марка чугуна	Расход FC75л6, кг/ковш с куском Sibar®22л3 (150–200 г) в форму	Диапазон НВ	НВ по НД
Вал коленчатый 11183/Gh75–50–03	–	241–269	250–302 *
Вал коленчатый 21213/Gh75–50–03	–	239–272	
Валик привода масляного насоса 2101/Gh65–48–05	–	249–260	190–280
Маховик 2108/Gh56–40–05	–	229–239	180–250
Суппорт переднего тормоза 2101/Gh56–40–05	11,5	241–249	
Суппорт переднего тормоза 2110/Gh56–40–05	4,5 (4)	217–241	
Суппорт переднего тормоза 2121/Gh56–40–05	6	226–229	
Коробка дифференциала 2108/Gh56–40–05	5	202	
Коллектор выпускной 2108/Gh56–40–05	7	224–229	
Ступица заднего колеса 2110/Gh56–40–05	4	217–229	
Коллектор выпускной 2123/ЧВГ40	–	217–229	
Картер редуктора заднего моста 2101/ВЧ50	9	207–217	170–220
Ступица переднего колеса 2101/ВЧ50	7	229–239	170–210 **

* Твердость в нормализованном состоянии.

** Твердость в отожженном состоянии.

риалов FC75л6 и FC75л3 и коэффициент различия расхода серийных и опытного модификаторов (согласно данным табл. 7) данное неравенство позволяет определить максимальную экономически целесообразную стоимость опытного модификатора Sibar®22л3.

Сравнивая коэффициенты различия расхода серийного и опытного модификаторов в зависимости от раннего модифицирования в выражении (4) и позднего модифицирования в выражении (7), видно, что экономически выгоднее позднее модифицирование.

В общем виде данное неравенство может быть записано следующим образом:

$$C_M(\gamma) < C_M(\alpha) + C_M(\beta) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Pi_i}{K_i} [P(\beta_{сер})_i^K - P(\beta_{от})_i^K]}{\sum_{i=1}^n \frac{\Pi_i}{K_i} \cdot P(\gamma)_i^K}, \quad (8)$$

где $C_M(\alpha)$, $C_M(\gamma)$ – стоимости серийного (α) и опытного (γ) модификаторов кусковой фракции, руб./т; $C_M(\beta)$ – стоимость серийно применяемого модификатора в крупке, руб./т; K_i – коэффициент емкости ковша, используемого для заливки i -й отливки; Π_i – годовая программа производства i -й отливки, т; $P(\beta_{сер})_i^K$ – ковшовая норма расхода серийного модификатора в крупке

для заливки i -й отливки при работе по серийной технологии, т; $P(\beta_{от})_i^K$ – ковшовая норма расхода серийного модификатора в крупке для заливки i -й отливки при работе по опытной технологии, т; $P(\gamma)_i^K$ – ковшовая норма расхода опытного модификатора кусковой фракции для заливки i -й отливки, т;

Разработанные методики позволяют оценивать эффективность использования альтернативного модификатора дробленой и кусковой фракции для ранней (ковшовой) и поздней (вторичной) графитизирующей обработки расплава чугуна, что позволяет ускорить и упростить процедуру принятия решения о целесообразности применения опытного модификатора взамен существующего.

Если сравнивать твердость и характер металлической матрицы при раннем (табл. 2 и табл. 3) и позднем модифицировании (табл. 5 и табл. 6), то, очевидно, что эффективность позднего модифицирования намного выше раннего модифицирования. Учитывая [4] малую растворимость бария в железе, а также относительно низкое давление пара в зоне растворения частиц модификатора (при 1600°C – 0,052 МПа) и невысокую температуру его плавления (710°C), а также полученные результаты, очевидно, что при раннем модифицировании процесс образования ЦЗ протекает достаточно интенсивно с последующим активным ростом ЦЗ и их флотированием в шлак.

Этот факт подтверждают также сведения фирмы

Таблица 6. Параметры микроструктуры чугуна опытных отливок при позднем (вторичном) модифицировании опытным модификатором Sibar®22л3

Деталь/Марка чугуна	Микроструктура		
	Форма, распределение и размеры графитовых включений	Металлическая основа	По НД
Вал коленчатый 11183/Gh75-50-03	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5; ССГ 90%	перлит пластинчатый, феррит 5-8% перлит пластинчатый, феррит 8-10%	Графит шаровидный, ССГ ≥ 90%; перлит пластинчатый, феррита до 8% (после нормализации), цементита ≤ 1%
Вал коленчатый 21213/Gh75-50-03	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5; ССГ 90%	перлит пластинчатый, феррит 1-3% перлит пластинчатый, феррит 3-5%	
Валик привода масляного насоса 2101/Gh65-48-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ 90%	перлитно-ферритная (80x20)	Графит шаровидный, ССГ ≥ 90%; перлит пластинчатый, феррит, цементита ≤ 5%
Маховик 2108 Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ 90%	перлитно-ферритная (70x30)	
Суппорт переднего тормоза 2101 Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ 90%	перлитно-ферритная (60x40)	
		перлитно-ферритная (50x50)	
Суппорт переднего тормоза 2110/Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ 90%	толстая часть: перлитно-ферритная (60x40) тонкая часть: ферритно-перлитная (80x20)	
Суппорт переднего тормоза 2121/Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ 90%	перлитно-ферритная (60x40)	
		перлитно-ферритная (65x35)	
Коробка дифференциала 2108/Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ 90%	ферритно-перлитная (55x45)	
		перлитно-ферритная (50x50)	
Коллектор выпускной 2108/Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5, 6; ССГ 90%	перлитно-ферритная (65x35)	
Ступица заднего колеса 2110/Gh56-40-05	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ 90%	перлитно-ферритная (50x50)	
Коллектор выпускной 2123/ЧВГ40	Графит вермикулярный ВГф2, ВГф3; шаровидный ШГФ4, ШГФ5	перлитно-ферритная (70x30)	
		перлитно-ферритная (75x25)	
Картер редуктора заднего моста 2101/ВЧ50	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №5; ССГ 90%	перлитно-ферритная (50x50)	Графит шаровидный, ССГ ≥ 80%; перлит пластинчатый, феррит, цементита ≤ 5%
Ступица переднего колеса 2101/ВЧ50	Графит шаровидный типов ОА, ОВ №6; ССГ 90%	перлитно-ферритная (55x45)	
		перлитно-ферритная (60x40)	

Elkem (Норвегия) о распределении барийсодержащего шлака в заливочном ковше. При высоком содержании в модификаторе бария продукты его реакции с при-

месями (серой и кислородом) образуются и выводятся из расплава в шлак в течение более длительного промежутка времени, чем при использовании низкобари-

Таблица 7. Программа производства отливок деталей из высокопрочного чугуна и нормы расхода модификатора ФС75лб при работе по серийной и опытной технологиям

Деталь/Марка чугуна	Количество форм, шт.	Программа на 2007 г.		Расход ФС75лб по серийной технологии		Расход ФС75лб по опытной технологии	
		в тоннах	в ковшах (1,2 т)	на ковш, кг	на программу, т	на ковш, кг	на программу, т
Вал коленчатый 2103, 11183, 2110/Gh75-50-03	246201	24522,41	20436	3	61,31	-	-
Вал коленчатый 21213/Gh75-50-03	16467	1690,41	1409	6	8,45	-	-
Валик привода масляного насоса 2101/Gh65-48-05	19029	1674,54	1396	8	11,17	-	-
Маховик 2108, 2110/Gh56-40-05	163453	12779,01	10650	7	74,55	-	-
Суппорт переднего тормоза 2101/Gh56-40-05	112144	7435,19	6196	13	80,55	11,5	71,25
Суппорт переднего тормоза 2108/Gh56-40-05	79558	2458,34	2049	8	16,39	4,5	9,22
Суппорт переднего тормоза 2110/Gh56-40-05	94154	3417,80	2849	8	22,79	4,5	12,82
Суппорт переднего тормоза 2121/Gh56-40-05	49371	2304,66	1921	12	23,05	6	11,53
Коробка дифференциала 2108/Gh56-40-05	76312	6776,48	5648	12	67,78	4	22,59
Коллектор выпускной 2108/Gh56-40-05	81586	4809,47	4008	11	44,09	7	28,06
Ступица заднего колеса 2110/Gh56-40-05	100603	6543,22	5453	12	65,44	4	21,81
Коллектор выпускной 2123/ЧВГ40	97429	3858,17	3216	7	22,51	-	-
Картер редуктора заднего моста 2101/ВЧ50	63203	5195,28	4330	12	51,96	9	38,97
Ступица переднего колеса 2101/ВЧ50	47976	3918,65	3266	11	35,93	7	22,86
Σ = 1247486 шт./год x 0,175 кг/шт. = 218310 кг/год = 218,31 т/год					585,97		239,11

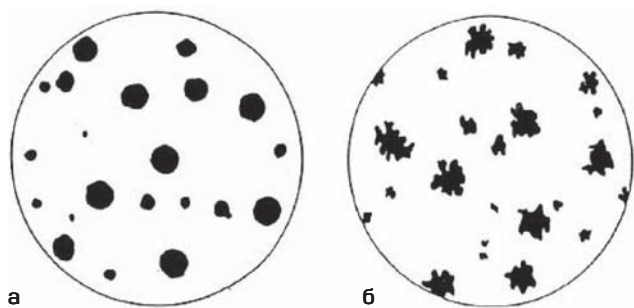


Рис. 1. Типы графита (x100) в микроструктуре высокопрочного чугуна: ОА (а) и ОВ (б)

евых модификаторов. При этом в жидком чугуне концентрация барьера постепенно монотонно снижается. Шлак концентрируется, главным образом, в двух местах – на днище ковша и на его стенке, противоположной носку. За счет периодического обмывания стенок ковша при разливе чугуна по формам в расплаве постоянно присутствует определенная остаточная концентрация барийсодержащего шлака, что может вызывать дополнительную стабилизацию эффекта модифицирования.

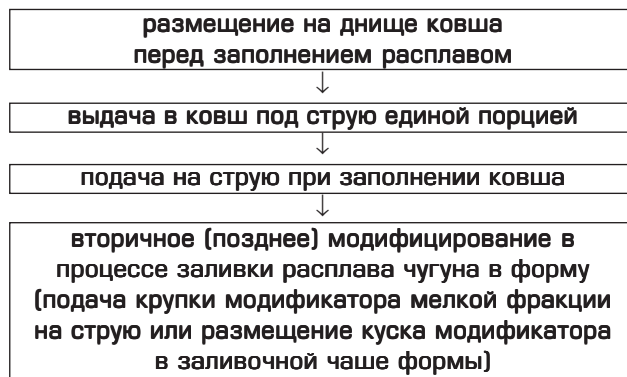
При позднем (вторичном) модифицировании расплава чугуна в чаше формы кусковым модификатором Sibar®22л3, оценивая морфологию графита, следует отметить значительное преобладание правильной шаровидной формы графита – тип ОА (по ГОСТ 3443–87 – ШГф5) (рис. 1, а), а при раннем (ковшовом) первичном модифицировании расплава чугуна модификатором Sibar®22 в крупке, наоборот, шаровидный графит представлен (рис. 1, б), преимущественно, типом ОВ (по ГОСТ 3443–87 – ШГф4) – неправильной формой. Обе формы шаровидного графита допустимы в микроструктуре чугуна, однако тип ОА характеризует более высокое качество и эффективность графитизирующей обработки высокобаристым ферросилицием, проводимой в предкристаллизационный период, что связано с большим количеством остающихся в расплаве ЦЗ. При анализе данных табл. 3 и 6 становится очевидным, что при использовании высокобаристого ферросилиция для ковшового модифицирования в микроструктуре отливок более мелких графитных включений №6 (по ГОСТ 3443–87 – ШГд45) в среднем больше, чем при позднем модифицировании кусковой фракцией в чаше формы, а количество более крупных включений №5 (по ГОСТ 3443–87 – ШГд90) в обоих случаях одинаково. При позднем модифицировании высокая концентрация ЦЗ обеспечивает оптимальное переохлаждение с высокой степенью перлитизации структуры, формирование правильной шаровидной формы графита – ШГф5 (см. рис. 1, а) и измельчение зерна матрицы чугуна. Снижение концентрации ЦЗ в расплаве при раннем модифицировании способствует снижению степени переохлаждения, что вызывает повышение доли феррита, укрупнение зерна матрицы и преобладание неправильной формы шаровидного графита – ШГф4 (см. рис. 1, б).

Раннее (ковшовое) модифицирование модификатором Sibar®22 позволяет решать проблему снижения твердости в отливках, а позднее модифицирование в

чаше формы – рост твердости и перлитизацию матрицы, то есть в зависимости от технологических задач необходимо применять тот или иной вариант ввода модификатора.

Выполненные исследования показали, что на качество модифицирования в большей степени влияет:

- способ подачи модификатора в расплав (ранжирование сверху вниз по степени эффективности):



- время его введения до начала затвердевания чугуна, которое должно быть минимальным.

Выводы:

1. Разработаны методики оценки целесообразности использования опытных графитизирующих модификаторов по двум схемам – для раннего (ковшового) модифицирования и для позднего модифицирования (в заливочной чаше формы) на основе технико-экономического анализа с учетом коэффициента различия расхода и технологических требований к отливке.
2. Использование кускового модификатора Sibar®22л3 позволило существенно снизить расход ФС75лб, а в некоторых случаях даже исключить его использование для ковшовой обработки высокопрочного чугуна. Sibar®22л3 является более эффективным аналогом в сравнении с ФС75л3 и БрФС65Ба1 (см. табл. 2 и 5).
3. Результаты проведенной опытной работы по освоению использования высокобаристого ферросилиция для модифицирования на ранней и поздней стадии показали высокую эффективность таких технологий на широкой номенклатуре отливок из высокопрочного чугуна всех марок. Для получения наибольшего эффекта технологии могут быть совмещены.

Список литературы

1. Давыдов С. В., Панов А. Г. Тенденции развития модификаторов для чугуна и стали // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №1. – С. 3–11.
2. Скаланд Т. Исследование продолжительности действия модификаторов в чугуне с графитом разной формы // Литейное производство. – 1999. – №6. – С. 11–13.
3. Литовка В. И., Дубровин А. С., Венгер В. В. Эффективные магнийсодержащие модификаторы // Литейное производство. – 1987. – №6. – С. 11–13.
4. Голубцов В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи. – Челябинск, 2006. – 422 с.