

## Литейное материаловедение, специальные способы литья

*Investigations and production tests of a number of important basic castings of high-duty cast iron with ball-like and vermicular shape of graphite are carried out.*

М. И. КАРПЕНКО, М. А. САЙКОВ, М. В. МАМАЕВА, РУП «ГЛЗ «ЦЕНТРОЛИТ»,  
Д. М. КУКУЙ, В. Ф. ОДИНОЧКО, БНТУ, А. П. МЕЛЬНИКОВ, ОАО «БЕЛНИИЛИТ»

УДК 621.74

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСНЫХ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ

Современное машиностроение характеризуется постоянным повышением уровня рабочих параметров и единичной мощности машин и агрегатов, использованием высоких давлений, скоростей и температур, что ведет к ужесточению требований к физико-механическим свойствам сплавов, среди которых широкое распространение получают высокопрочные чугуны. В последние годы основными требованиями к металлопродукции являются такие показатели качества, как конкурентоспособность, надежность и долговечность. Решение проблемы повышения конкурентоспособности и долговечности машин, станков, пневмо- и гидроаппаратуры приводов и другого оборудования в условиях интенсификации производства требует использования конструкционных материалов с высокими физико-механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами, к которым относятся высокопрочные чугуны с шаровидной и вермикулярной формой графита (ВЧШГ и ВЧВГ).

Требования к ВЧШГ и ВЧВГ как к конструкционным материалам непрерывно возрастают. Кроме прочности, пластичности и твердости все большее значение приобретают такие механические свойства, как сопротивление усталости при динамических и знакопеременных нагрузках, ударная вязкость и износостойкость. Именно эти механические характеристики в некоторых случаях определяют выбор конструкционного материала для литых корпусных деталей ответственного назначения и соответственно технологический процесс производства отливок.

Главная особенность процессов производства многих корпусных отливок заключается в том, что необходимо обеспечить в них оптимальные характеристики структуры и физико-механические свойства в массивных и тонких стенках, не

снижая заданной размерной точности, геометрической и технологической жесткости. При этом необходим подбор таких условий охлаждения, чтобы в массивных стенках отливок была достаточная плотность, заданная микроструктура, отсутствовали пористость, черные пятна, отбел, неспай, большие остаточные напряжения и трещины в тонких стенках. В то же время должна быть высокая жидкотекучесть расплава.

Это основное противоречие при изготовлении корпусных отливок, особенно для металлорежущих станков, решается практически индивидуально для каждой ответственной отливки с выбором технологического процесса литья и расчетом оптимальной литниковой системы, компьютерного моделирования процесса заливки, подбором и расчетом шихты, проведением плавки и изготовлением опытной партии отливок.

Важной особенностью процесса изготовления корпусных отливок является также необходимость изготовления и простановки в литейных формах большого количества сложных и массивных стержней, установки многих десятков жеробеек, высокого перегрева расплава и быстрой заливки, а также использования других эффективных технологических методов, операций и средств изготовления литейных форм, таких, как оптимизация химического состава и физического состояния выплавленного чугуна [1]. Важным также является учет факторов регулирования литой структуры [2], особенно на степень сфероидизации графита (ССГ) и проведение операций рафинирования, комплексного модифицирования, инокулирования и др. [3].

Известно, что при изготовлении литых корпусных деталей химический состав и механические свойства стандартных ВЧШГ устанавливаются в соответствии с ГОСТ 7293-85, 7769-82

Таблица 1. Классификация станкостроительных отливок из высокопрочного чугуна

Класс	Группа	Основные требования к деталям	Типичные представители деталей	Балл перлита и графита по ГОСТ 3443-87	Марка чугуна
1	а	Высокая прочность	Корпусные детали машин, редукторов, станков и другого оборудования	П92	ВЧ45, ВЧ50
	б	Повышенная износостойкость	Столбы, салазки, суппорты, направляющие и т. п.	П70	ВЧ50, ВЧ60
	в	Работа при давлениях более 20 МПа	Корпуса золотников и гидро- и пневмоаппаратуры приводов	П70	ВЧ50, ВЧ60
2	а	Высокая прочность и пластичность	Стойки, траверсы, плиты, столы, шиберы станков, литейных машин и прессов		ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45
	б	Пневно-и гидроплотность, давления свыше 20 МПа	Корпуса и крышки насосов, коллекторов, клапанов, приводов и др.		ВЧ40, ВЧ 45
3	–	Высокие антифрикционные свойства	Втулки, направляющие и корпуса подшипников машин и станков	ШГФ2 ШГФ5	АЧВ-1

и 1585-85, а отливок из ВЧВГ – с ГОСТ 28894-89. В зависимости от условий работы и назначения корпусные и базовые литые детали станко- и машиностроения подразделяются на классы, а внутри классов – на группы. В табл. 1 приведены рекомендуемые марки чугуна, типичные представители литых деталей станкостроения и требования к микроструктуре в соответствии с ОСТ 2 МТ29-1-87. В тяжелом, транспортном, автотракторном, сельскохозяйственном и других отраслях машиностроения потребность в отливках из ВЧШГ и ВЧВГ еще большая, а требования к их структуре и свойствам более высокие.

На ГЛЗ «Центролит» освоены и применяются технологические процессы производства станкостроительных отливок групп *а*, *б* и *в* класса 1, которые используются в литом состоянии без дополнительной термической обработки.

При изготовлении литейных форм для корпусных отливок станко- и машиностроения используются следующие технологические методы и средства: простановка холодильников, экзотермических и модифицирующих брикетов, питающих бобышек, фильтровальных сеток и фильтров из вспененной керамики, легирующих сотообразных и сетчатых вставок, специальных стержней и жгутов. Для изготовления отдельных ответственных отливок применяют также жидкие самотвердеющие смеси, оболочковые формы, импульсную формовку, способы формовки в стержнях и жакетах, литье в кокиль и другие специальные способы литья.

Особенно высокие и стабильные физико-механические свойства ВЧШГ ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ , КСУ, износостойкость и плотность) достигаются при проведении

плавов дуплекс-процессом (индукционная тигельная среднечастотная печь емкостью 3т и индукционный миксер) с использованием 15% чушковых рафинированных чугунов и вторичных шихтовых материалов при заливке в оболочковые формы и на автоматической линии импульсной формовки.

При конструировании корпусных отливок из ВЧШГ предусматривают меры для предупреждения образования трещин и коробления. Для повышения технологической жесткости и демпфирующей способности базовых отливок используются ребра жесткости, диагональные и П-образные перегородки, а также увеличенные радиусы в углах.

Для воздействия на физическое состояние расплавов проводят необходимые операции перегрева, печной и внепечной обработки [1], включая операции рафинирования, легирования медью, сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования. В серийном производстве используют магнийсодержащие (Elmog и др.) и барийсодержащие (Varinos и др.) модификаторы. При этом применяются процессы внутрiformенного модифицирования для получения корпусных отливок из ВЧШГ и ЧВГ, для чего был разработан и запатентован брикет для модифицирования чугуна [4], получаемого из измельченного до фракции 0,05–2,0 мм силикобария, лигатуры ЖКМК-5 фракции 0,1–0,2 мм, металлического иттрия, порошков нитридов марганца и ферросиликоциркония фракции 0,05–2,0 мм. Исходные материалы механически перемешивали в катковых мельницах и подвергали гидростатическому прессованию с удельным давлением 0,2 МН/см<sup>2</sup>. В табл. 2 приведены механические и технологические свойства

Таблица 2. Механические и технологические свойства высокопрочных чугунов в отливках

Состав брикета	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, ж/см <sup>2</sup>	Трещиностойкость, см	Графит, %		Стойкость при контактно-ударном нагружении, тыс.
					ШГ	ВГ	
1	461–490	14,6–15,4	81,5–82	18,2–18,8	88–89	11–12	380–450

высокопрочных чугунов в отливках, полученных с использованием этого модифицирующего брикета.

Для изготовления корпусных отливок из высокопрочных чугунов разработаны и запатентованы два состава высокопрочных чугунов [5, 6], которые позволяют получать в отливках в зависимости от их массы и толщины стенок повышенные механические свойства, соответствующие маркам ВЧ50, ВЧ60 и ВЧ70.

Для корпусных массивных отливок разработан состав экономно-легированного высокопрочного чугуна [5], позволяющего получать в тонких стенках низкие остаточные термические напряжения (не более 25 МПа) и в массивных стенках – высокую прочность: при толщине стенок 100 мм  $\sigma_b = 612\text{--}730$  МПа и при толщине 250 мм  $\sigma_b = 535\text{--}641$  МПа. При дополнительном введении в чугун 0,002–0,04% бария значительно снижаются остаточные термические напряжения в отливках, степень сфероидизации графита повышалась от 65–70 до 83–98%. Высокая графитизирующая способность барийсодержащих ферросплавов позволила использовать их при производстве непрерывными методами литья сложных профильных заготовок из ВЧШГ [6], в составах модифицирующих смесей [7] с повышенной графитизирующей способностью и при модифицировании чугунов для всех корпусных отливок в производственных условиях, получаемых при оболочковом литье и импульсной формовке.

Вместе с высокими требованиями к качеству литых деталей сегодня особое значение приобретает необходимость снижения затрат на энергоносители в литейных цехах, что имеет первостепенное значение при плавке и внепечной обработке Fe-C-сплавов.

В последние годы наряду с использованием внутрiformенного модифицирования с помощью брикетов применяют обработку расплавов комплексными модификаторами и лигатурами в ковшах. Получены отливки ступицы Н-12900301 для Бобруйскагромаша из ВЧШГ, которые ранее отливали из стали. На автоматической линии импульсной формовки в опоках 960×700 мм освоено производство из ВЧШГ достаточно сложной отливки У2210-209 «водило» и многих других корпусных отливок.

В производственных и лабораторных условиях определены эффективные способы модифицирования и оптимальные химические составы ЧВГ и ВЧШГ с учетом механических свойств в массивных направляющих и склонность к отбелу в тонких стенках, а также литейно-технологичес-

ких свойств: жидкотекучесть, склонность к образованию усадочных дефектов и отбел. Для получения низкого содержания серы плавку производили в индукционных печах емкостью 0,4 т и при дуплекс-процессе (вагранки с индукционной печью емкостью 1 т) с промежуточной операцией по десульфурации посредством  $\text{CaC}_2$ . По окончании плавки брали предварительную пробу на содержание серы. При этом точность анализа была  $\pm 0,001\%$  S. При внепечной обработке высокопрочных чугунов использовали сфероидизирующие, инокулирующие и графитизирующие модификаторы с осуществлением способов модифицирования в различной последовательности и разными временными интервалами между ними. Структурные составляющие высокопрочных чугунов количественно оценивали ГОСТ 3443-87 на темплетях, вырезанных из отливок.

Из-за высокого содержания примесных элементов в металлическом ломе и стружке в чугунах производственных плавков структура металлической основы была перлитной (не менее 90%) с 3–5% цементита, остальное – феррит. Твердость чугуна доходила до 241–275 НВ, а относительное удлинение не превышало 2–5%. Использование специальных комплексных графитизирующих модификаторов позволило повысить относительное удлинение до 8–12% и снизить твердость до 163–245 НВ при производстве высокопрочного чугуна марки ВЧ50.

В зависимости от емкости ковша выбирали сфероидизирующие модификаторы с разными фракционными составами с учетом того, что фракции малых размеров (пылевидные) при попадании в ковш окисляются или выносятся воздушными тепловыми потоками. Это приводит к неизбежным потерям модификатора. Поэтому обычно в ковшах емкостью до 500 кг использовали модификатор фракции 0,8–4,0 мм, а в ковшах емкостью 1 т – фракции 1–6 мм. В табл. 3 приведены составы используемых комплексных сфероидизирующих модификаторов, выпускаемых в соответствии с ТУ 14-5-248-01, а в табл. 4 – характеристики структуры и механических свойств модифицированных чугунов.

Установлено, что обработка чугуна сфероидизирующими магнийсодержащими присадками в специальных барабанных ковшах, основанная на одновременном вводе в металл требуемой дозы модификатора, несмотря на отдельные достоинства и простоту, не позволяет качественно удалять остатки шлака и достичь высокого усвоения магния. Это происходит главным образом потому, что реакция модифицирования проходит в ло-

Таблица 3. Составы сфероидизирующих модификаторов

Марка модификатора	Массовая доля, %						Фракция, мм
	Mg	Ca	TRE	Ba	Si	Al	
FeSiMg5 (ФСМг5-Б)	5,0–5,5	0,3–0,8	0,3–0,8	–	45–50	До 1,2	1,0–4,0
FeSiMg6 (ФСМг6-Б)	5,5–6,0	0,3–0,8	0,3–0,8	–	50–55	1,0–1,5	1,0–4,0
FeSiMg910Ba4	8,5–9,0	0,8–1,0	–	3,7–4,0	45–48	До 1,2	0,8–4,0
FeSiMg923	9,0–9,5	1,5–2,0	2,8–3,0	–	45–48	До 1,5	0,8–4,0

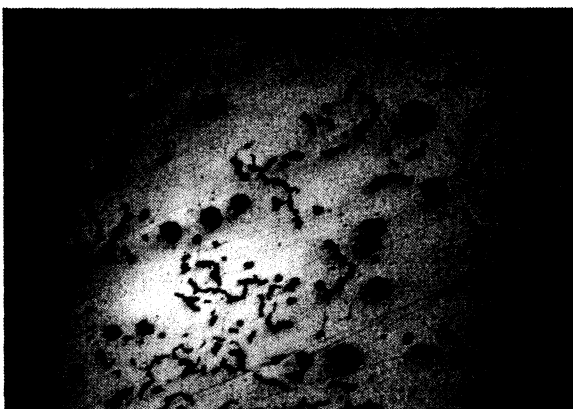
Таблица 4. Характеристики структуры и механических свойств модифицированных чугунов

Марка модификатора	Количество вводимого модификатора, %	Количество и дисперсность перлита		Металлическая основа	Механические свойства чугуна в отливках		
		%П	ПД		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
FeSiMg5	0,9	92	ПД 0,5-ПД 1,4	П-Ф	520	8,2	207
FeSiMg6	1,1	96	ПД 0,5-ПД 1,4	П-Ф	532	8,7	212
Fe-SiMg910Ba4	1,1	85	ПД 0,3-ПД 1,0	Ф-П	528	12,2	175
FeSiMg923	0,9	100	ПД 0,3-ПД 1,4	П-Ф	536	7,6	224

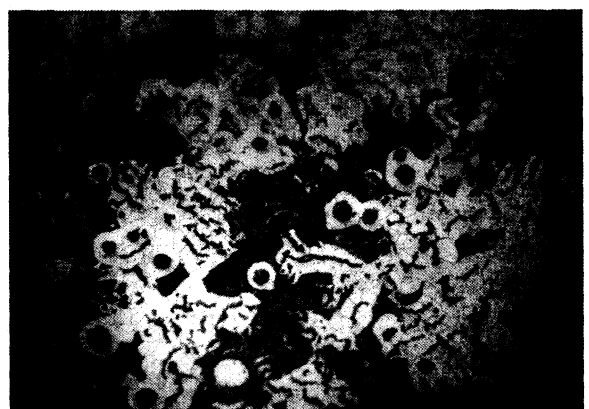
кальном участке и пузырьки испаряющегося магния, поднимаясь к поверхности расплава, имеют ограниченное время контакта с расплавом. Площадь контакта магния с жидким металлом и, следовательно, усвоение магния значительно повышаются, если модифицирование чугуна производить в высоких конических ковшах. В этом случае необходимая масса используемого модификатора в значительной степени снижается по сравнению с процессом модифицирования чугуна в барабанном ковше и составляет, как правило, 0,08 – 0,11% для ВЧШГ и 0,02 – 0,06% для ВЧВГ. Эффективным является позднее модифицирование в струе металла для стационарных разливочных установок или ковшей. Оптимальным для массивных корпусных отливок является повышенное остаточное содержание в чугуне магния (0,04 – 0,08%). В случае низкого остаточного содержания магния (менее 0,04%) получается графит вермикулярной, пластинчатой или смешанной формы (см. рису-

нок), а при содержании магния, превышающем 0,08–0,10%, в чугуне толстостенных отливок появляются включения графита шиповидной формы, образующегося обычно у границ зерен. При содержании его в чугуне 0,10% и более проявляется не столько модифицирующее, сколько легирующее действие магния, в результате чего понижается активность углерода, чугун кристаллизуется с отбелом, повышается твердость отливок и ухудшается их обрабатываемость резанием.

Использовали также и другие эффективные импортные модификаторы (Elmag, Zircinoc, Varipos, VL 63 (M), МК 21, МКМг 19 и др.) и способы введения модификаторов в литейные ковши. Как правило, в процессах с использованием недостаточно рафинированных расплавов усвоение магния снижается, а объем шлака и выделение дыма возрастают. Кроме того, усложняется графитизирующее модифицирование чугуна. И, наоборот, в процессах с хорошо рафинированными распла-



а



б

Структура высокопрочного чугуна с вермикулярной формой графита в корпусных отливках до травления (а) и после травления (б)

вами, протекающими менее интенсивно, усвоение магния повышается, снижается объем шлака и уменьшается выделение дыма. Также создаются очень благоприятные условия для вторичного, графитизирующего модифицирования чугуна. В опытных плавках использовали фракцию модификаторов от 0,8 до 4,0 мм для обеспечения быстрого растворения в чугуне и хорошей сыпучести материала при его дозировании.

Надежно устраняет отбел вторичное модифицирование ферросилицием ФС75, который содержит до 4% бария. Применять силикокальций не рекомендуется из-за плохой растворимости и усвояемости его в чугуне. Оптимальная доза графитизирующих модификаторов ~0,6%. При использовании в производственных условиях ферросилиция ФС45 его расход – 0,34%. Выход годного – 50,4%.

Был выплавлен ряд составов ВЧВГ и отлиты образцы для механических испытаний, технологической пробы и изготовлены корпусные отливки. Требования к химическому составу исходного чугуна, предназначенного для обработки на ВЧВГ, по основным элементам (углероду, кремнию, марганцу, сере), предъявляли такие же, как при производстве ВЧШГ (табл. 5). В отличие от ВЧШГ для ВЧВГ имеют место менее жесткие требова-

ния по содержанию фосфора, а также титана (до 0,05% Ti). В структуре отливок из ВЧВГ, изготовленных на автоматической линии импульсной формовки, обычно содержалось 70% ШГ и 30% ВГ, а механические свойства соответствовали марке ЧВГ45.

Достаточно эффективный комплексный модификатор [8] для сфероидизирующей обработки ВЧШГ и ВЧВГ разработан на ПО «Гомсельмаш». Модификатор содержит 25–40% ферросилиция FeSi75A11, 25–40% отсева модификатора ФСМ-7 по ТУ 14-5-134-86 и измельченный графит – остаточное. Его изготавливают и используют непосредственно в цехе высокопрочного чугуна завода для изготовления корпусных деталей кормоуборочных комбайнов, которые ранее изготавливались из ковкого чугуна марок КЧ35-10 и КЧ37-12. Модификатор обеспечивает в отливках высокие характеристики ударной вязкости (до 11,2–18 Дж/см<sup>2</sup>) и высокую дисперсность структуры.

Проведены исследования и производственные испытания ряда ответственных корпусных отливок из ВЧШГ и ВЧВГ, в которых принимали участие сотрудники ИТМ НАН Беларуси, РУП «ГЛЗ «Центролит», РУП «Гомельский завод литья и нормалей», кафедр МиТЛП БНТУ, ГГТУ им. П. О. Су-

Таблица 5. Шихта для EGP-3000S, марка ВЧ50, ГОСТ 7293-85 для автоматической линии импульсной формовки цеха № 3

Наименование шихтовых материалов	Количество на завалку в печь		Содержание элементов, мас. %																
			C		Si		Mn		Cr		S		P		Cu		Mg		
	%	кг	в исходной	в шихте	в исходной	в шихте	в исходной	в шихте	в исходной	в шихте	в исходной	в шихте	в исходной	в шихте	в исходной	в шихте	в исходной	в шихте	
Чугун литейный	30	900	4,00	1,20	1,20	0,36	0,30	0,09	0,05	0,02	0,02	0,006	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Лом стальной	32,1	963	0,10	0,03	0,17	0,05	0,50	0,16	0,05	0,02	0,02	0,006	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Возврат	37,9	1137	3,25	1,23	2,45	0,93	0,50	0,19	0,07	0,03	0,02	0,008	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ФС45	0,34	10	0,20	0,001	45	0,15	1	0,00	0,50	0,00	0,02	0,000	0,05	0,000					
ФМн78	0,2	6	7,00	0,014	6	0,01	78	0,16			0,02	0,000							
Карбюризатор	1,8	54	90	1,62							0,10	0,002							
Медь М1-М3	0,3	9													99	0,30			
Угар, %			-10	-0,41	5	0,08	-20	-0,12	-1	-0,001		0,000		0,00		0,00		0,00	
Жидкий металл в печи				3,69		1,58		0,48		0,059		0,022		0,03		0,30			0,00
Elmag	1,85	56	-5,00	-0,09	48	0,89					-25	-0,005						6	0,04
Zircinoc (Barinoc)	0,5	15			75	0,38													
В отливке расчетный				3,60		2,85		0,48		0,059		0,02		0,03		0,30			0,04
В отливке допустимый				3,2–3,7		1,9–2,9		0,3–0,7		до 0,1		до 0,015		до 0,1		до 0,28			0,04–0,05

хого, ММГУ (г. Москва) и других организаций. Они позволили разработать и рекомендовать для внедрения новые составы высокопрочных чугунов [6, 7, 9], комплексного сфероидизирующего модификатора [8], ряда модифицирующих графитизирующих смесей на основе ферросиликобария и поверхностно-активных добавок, экономно-легированных синтетических чугунов и ВЧВГ не только для корпусных деталей металлорежущих станков, но и сложнапряженных антифрикционных деталей двигателей Евро-3 и Евро-4, компрессоров, пневмо- и гидроаппаратуры, комбайнов ПО «Гомсельмаш», тракторов ВТЗ (г. Влади-

мир), автомобилей БелАЗ (г. Жодино) и др. Это в основном термообрабатываемые корпусные отливки с металлической основой из бейнита, аустенита или мартенсита, имеющие высокую прочность ( $\sigma_B$  более 800 МПа) и работающие в режиме интенсивного изнашивания при трении (при 20–30 МПа·(м/с)).

Они начинают использоваться в высокоскоростных механизмах трения вместо антифрикционных чугунов АЧВ-1, АЧК-1, АЧС-1 и АЧС-2 (ГОСТ 1585-85), легированных высокопрочных чугунов марок ВЧ70 и ВЧ80 (ГОСТ 7298-85) и ЧНМШ, ЧНХТ и ЧНХМД (ГОСТ 7769-82).

### Литература

1. Сайков М. А., Грищенко В. С., Карпенко М. И. и др. Производство чугунных отливок ответственного назначения в условиях завода РУП ГЛЗ «Центролит» // *Литье и металлургия*. 2008. № 3. С. 98–101.
2. Литовка В. И. Повышение качества высокопрочного чугуна. Киев: Наукова думка, 1987.
3. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко и др. Киев: Наукова думка, 1986.
4. Одарченко Б. В., Карпенко М. И., Мельников А. П. и др. Брикет для модифицирования чугуна: А. с. СССР № 1548240.
5. Карпенко М. И., Митрошкин Ю. Г., Марукович Е. И. и др. Высокопрочный чугун для массивных отливок: А. с. СССР № 1446186.
6. Карпенко М. И., Марукович Е. И., Мельников А. П. и др. Высокопрочный чугун: А. с. СССР № 1511290.
7. Карпенко М. И., Мельников А. П., Марукович Е. И. и др. Модифицирующая смесь: А. с. СССР № 1468954.
8. Карпенко М. И., Марукович Е. И., Сусло П. П. др. Комплексный модификатор чугуна: Пат. ВУ № 9935.
9. Алов В. А., Карпенко М. И., Епархин О. М. и др. Высокопрочный чугун: Пат. RU № 2298048.