

УДК 669.131

С.В. Давыдов, Д.А. Болдырев, В.М. Сканцев, Л.И. Попова

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЧУГУНЫ С КОМПАКТНЫМИ ФОРМАМИ ГРАФИТА**

Показана идентичность механических свойств ковкого чугуна (КЧ) и чугунов с компактными формами графита, в частности с шаровидным и вермикулярным графитом (ЧШВГ). С учётом принципиального различия технологий получения КЧ и ЧШВГ с позиций их трудо-, материало- и энергоёмкости показано, что технически и экономически предпочтительным является изготовление отливок из ЧШВГ и других чугунов с компактной формой графита.

Ключевые слова: ковкий чугун, чугун с шаровидным и вермикулярным графитом, компактный графит, модифицирование, микроструктура, механические свойства.

К классу чугунов с компактным графитом (ЧКГ) относятся как стандартные типы чугунов – КЧ, ЧШГ и ЧВГ, так и их комбинированные модификации, имеющие в своей структуре графит любой морфологии, кроме пластинчатого и вырожденного.

Известно, что технология получения отливок из КЧ путём длительного графитизирующего отжига отливок из белого чугуна (БЧ), характеризующаяся высокой трудо- и энергоёмкостью, является ввиду указанных принципиальных недостатков достаточно дорогостоящей и в настоящее время практически неконкурентоспособной [1].

Технико-экономический анализ, проведённый на многих литейных предприятиях в 1970-80 гг., показал, что перевод номенклатуры отливок с КЧ на ЧШГ даёт определённые преимущества, в частности снижение себестоимости получения отливок, повышение уровня их механических свойств. В ОАО «АвтоВАЗ» в начале 1980-х гг. с марки КЧ45-6 (ГОСТ 1215-79) на наиболее технологичную марку ВЧ50 (ГОСТ 7293-85) были переведены, например, отливки таких корпусных деталей, как 2101-2402018 «Картер редуктора заднего моста» и 2101-2402019 «Крышка подшипника дифференциала заднего моста» (рис. 1, 2). Однако с точки зрения идентичности, равнозначности получаемых механических свойств и, как следствие, коэффициента запаса прочности ВЧ не является рациональной альтернативой КЧ.



Рис. 1. Отливка «Картер редуктора заднего моста»

Выдвинуто предположение, что по комплексу свойств КЧ в общем случае наиболее близок к ЧШВГ и является ему наиболее рациональной заменой.

В отдельных частных случаях КЧ в отливках может быть успешно заменён на ЧВГ (ГОСТ 28394-89). Так, в ОАО «АвтоВАЗ» в 2014 г. были проведены работы по освоению изготовления отливок «Картер редуктора заднего моста» и «Крышка подшипника дифференциала заднего моста» из ЧВГ40, ранее внедрённого для получения отливок «Вал распределительный» (рис. 3) взамен ВЧ50. По результатам выполненных работ для данных деталей разработаны химический состав ЧВГ, а также требования к механическим свойствам и микроструктуре.

Химический состав ЧВГ предложен на основе базового химического состава чугуна ВЧ50.

Требования к временному сопротивлению и относительному удлинению аналогичны марке ЧВГ40 ( $\sigma_b \geq 400$  МПа,  $\delta \geq 1\%$ ), к твёрдости по Бринеллю – марке ВЧ50 (170-220 НВ), к микроструктуре разработаны новые требования. Годовой экономический эффект – 1,1 млн руб.



Рис. 2. Отливка «Крышка подшипника дифференциала заднего моста»

Относительно ЧШВГ до сих пор сохраняется распространённая и устоявшаяся точка зрения, что чугун с содержанием шаровидного графита менее 80% уже не определяется как высокопрочный чугун с шаровидным графитом, но и не классифицируется как чугун с вермикулярным графитом, являясь при этом примитивным продуктом нестабильной, неотработанной технологии. Однако на практике было доказано, что ЧШВГ может быть применён для изготовления некоторых деталей автомобиля, требующих повышенных теплофизических свойств.



Рис. 3. Отливка «Вал распределительный»

Например, в некоторых моделях автомобилей ВАЗ из чугуна со смешанным неогвариваемым содержанием шаровидного и вермикулярного графита изготавливается такая термически и механически нагруженная деталь, как выпускной коллектор, изначально получаемая из высокопрочного чугуна марки ВЧ50 (рис. 4).



Рис. 4. Отливка «Коллектор выпускной»

Результаты стендовых натурных и дорожных ресурсных испытаний убедительно доказали равнозначную работоспособность выпускных коллекторов из ВЧ50 и ЧШВГ, так как при самом широком варьировании содержания вермикулярного графита в структуре чугуна его теплофизические характеристики будут выше, чем у стандартного высокопрочного чугуна марки ВЧ50.

При этом технология получения ЧШВГ является наиболее простой, так как предполагает использование имеющихся ковшей с любым характеристическим соотношением (отношение высоты рабочего пространства ковша к его среднему диаметру) для сфероидизирующей обработки с исходной конструкцией футеровки, а также любых магнийсодержащих лигатур (тяжёлых, полутяжёлых или лёгких) по принципу немодифицирования с использованием любой технологической схемы их введения в ковш («заливка сверху», «сэндвич-процесс» и его аналоги, «ковш с крышкой» и др.) (рис. 5) [2-4] при правильно подобранном расходе, исключающем формирование в микроструктуре чугуна пластинчатой формы графита.

Наиболее рациональными и предпочтительными с точки зрения трудоёмкости изготовления конструкции футеровки ковша путём её дооснащения и процесса обработки расплава чугуна в ковше сфероидизирующими лигатурами являются технологические схемы «модифицирование в плавящемся контейнере» и «заливка сверху» (рис. 5б,в) [5-7].

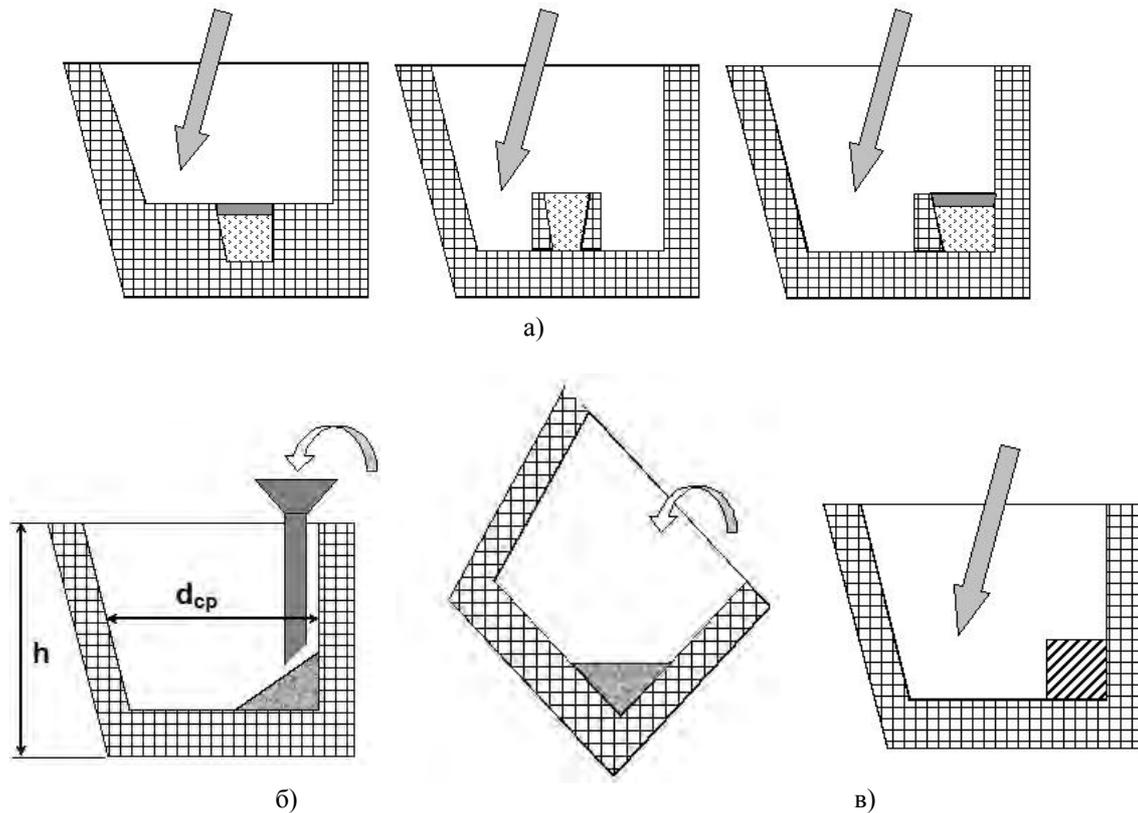


Рис. 5. Технологические схемы ковшевого сфероидизирующего модифицирования высокопрочного чугуна лёгкими лигатурами: а - на основе сэндвич-процесса (варианты); б - заливка сверху; в - модифицирование в плавящемся контейнере (стрелкой показано направление заливки металла в ковш)

Обобщённый сравнительный анализ параметров микроструктуры и показателей механических свойств ЧШВГ и КЧ45-6 на ферритно-перлитной основе показал, что при практически идентичном содержании ферритной составляющей в металлической основе (50-75%) КЧ45-6 и ЧШВГ (при содержании ШГ 15-55%) последний показал повышенные механические свойства, позволяющие отнести ЧШВГ по временному сопротивлению (по ГОСТ 1215-79) к марке КЧ55-4, а по относительному удлинению – к марке КЧ45-6 [8].

Таким образом, ЧШВГ по своим механическим свойствам, являющимся главными сдаточными характеристиками готовой товарной продукции, идентичен КЧ и отличается от него только морфологией графитных включений. Очевидно, что ЧШВГ, несмотря на технологическую простоту его получения, при наличии только требований к механическим свойствам (без оговора параметров микроструктуры) может быть полноценно использован взамен КЧ.

Вместе с тем полный отказ от КЧ нецелесообразен. На базе традиционных КЧ разработан новый тип чугунов. Эти чугуны имеют мелкодисперсную графитную фазу компактной формы, поэтому предложено называть их ковкими чугунами с компактным графитом (КЧКГ). Графит компактной формы образуется при высоком соотношении содержания серы и марганца ( $S/Mn$ ) в чугуне в результате его легирования серой, либо снижения содержания марганца, либо и того и другого.

Используя легирование чугуна серой, можно достичь следующих целей: отбела чугуна в отливках при его затвердевании, несмотря на высокое содержание в нем  $C$  и  $Si$ ; быстрой графитизации в твёрдом состоянии с образованием компактного графита вместо пластинчатого в аналогичном чугуне, выплавленном традиционным способом.

Для подавления выделения первичного графита и понижения термодинамической стабильности цементита чугуны модифицируются висмутом и теллуром.

В табл. 1 приведены рекомендуемые режимы графитизирующего отжига сернистых чугунов с двумя различными уровнями содержания Si: I – среднекремнистые (~ 1,8% Si); II – высококремнистые (~ 3% Si).

Таблица 1

## Оптимальные режимы графитизирующего отжига

Тип чугуна	Оптимальная длительность графитизирующего отжига, ч			
	На перлит		На феррит	
	850°C	950°C	850°C	950°C
I	2,0	0,5	2,0/120	0,5/120
II	0,5	0,33	0,5/240	0,33/240

Примечание. В числителе – первая стадия графитизации, в знаменателе – вторая стадия графитизации (скорость охлаждения  $V_{\text{охл}}$ , °C/ч).

Для стабилизации сквозного отбела в отливках чугуны обработаны Вi и Те. Высокое содержание Si в сплавах позволило использовать вместо полного цикла графитизирующего отжига укороченный цикл, заключающийся в горячей выбивке отливок и помещении их в теплоизолированный термостат при 980°C с постепенным охлаждением в нём до 950°C в течение 2 ч, после чего дальнейшее охлаждение на перлитно-ферритную структуру происходило на воздухе.

Механические свойства типовых сернистых чугунов приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Химический состав и механические свойства сернистых чугунов

№ чугуна	Тип чугуна	Химический состав*, %			Длительность отжига при 950...980°C, ч	Механические свойства			
		C	Si	S		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
1	I	2,92	2,54	0,28	2,0	710	650	2,0	30
2		3,28	2,76	0,35	1,0	550	500	2,6	10
3	II	2,90	3,55	0,33	0,5	470	430	5,5	00
4		3,12	3,97	0,40	0,25	490	460	6,5	80

\* Хром содержится в виде примеси - 0,09...0,11%; фосфора не более 0,1%; марганца не более 0,4%.

Как видно из табл. 2, в предлагаемом классе сплавов достигнуты механические свойства, промежуточные между свойствами ЧШГ и КЧ, с одной стороны, и СЧ - с другой.

При полном цикле отжига КЧ, но при пониженных температурах формируются ферритные чугуны.

С ростом содержания углерода и кремния в чугуне и с повышением температуры отжига происходит интенсивная ферритизация матрицы, причем столь интенсивная, что выделение мельчайших включений графита наблюдается внутри ферритных зерен (рис. ба).

Влияние кремния при отжиге ковких чугунов с компактным графитом является определяющим. При содержании кремния более 3% (чугун типа II, табл. 2) графит отжига неравномерный, местами крупный и малокомпактный (рис. ба).

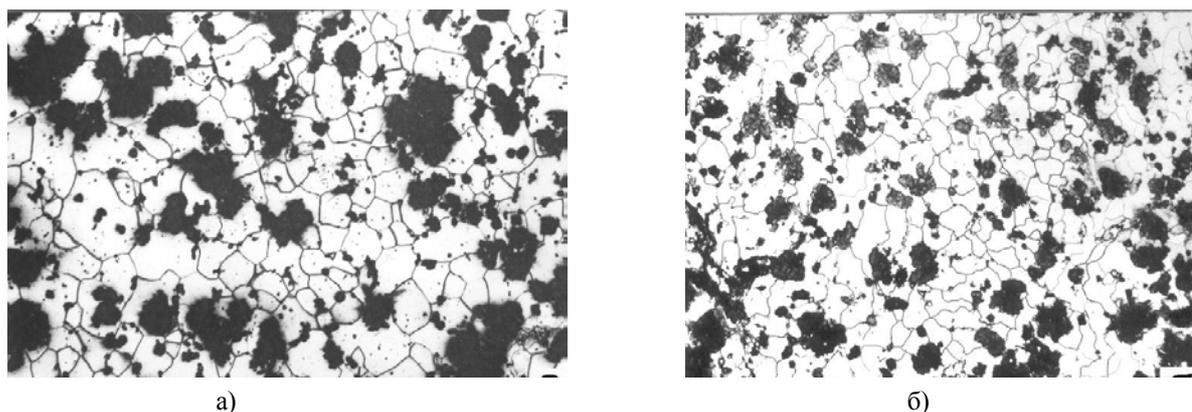


Рис. 6. Ферритный КЧ после отжига в течение 30 мин и охлаждения со скоростью  $120^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ ,  $\times 100$  (травление ниталем): а – чугун типа II; б – чугун типа I

При содержании кремния менее 3% (чугун типа I, табл. 2) компактность графита заметно увеличивается и его распределение в ферритной матрице чугуна становится значительно более равномерным (рис.6б).

При графитизирующем отжиге на перлитный чугун вторая стадия графитизации заменяется регулируемым охлаждением, причём с понижением температуры и повышением скорости регулируемого охлаждения в структуре чугуна начинают протекать локальные процессы образования перлита.

При сохранении всех режимов графитизирующего отжига, но при охлаждении чугуна на воздухе после первой стадии графитизации перлитная структура получается практически во всех чугунах (рис. 7).

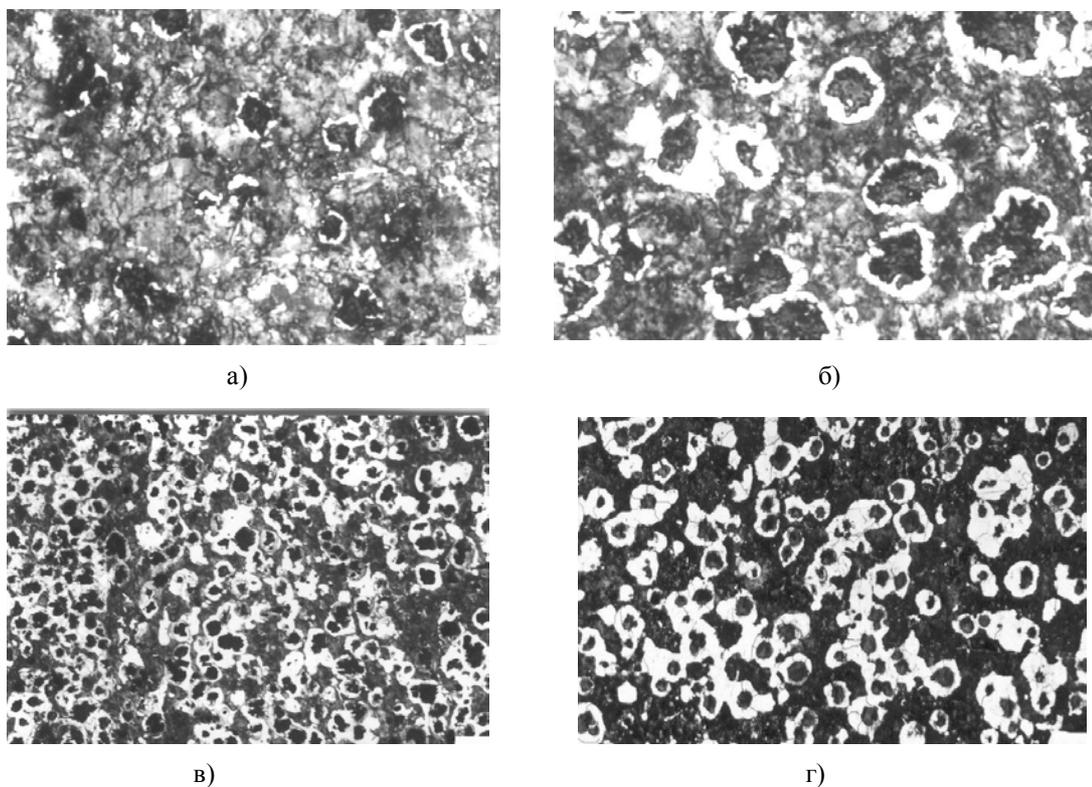


Рис. 7. Перлитные КЧ с компактной формой графита после отжига при  $950^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин и охлаждения на воздухе (травление ниталем): а – чугун 1 ( $\times 250$ ); б – чугун 2 ( $\times 250$ ); в – чугун 3 ( $\times 100$ ); г – чугун 4 ( $\times 100$ )

Новые сплавы отличаются повышенной износостойкостью, хорошими антифрикционными свойствами, прирабатываемостью и обрабатываемостью резанием. Они уступают ковким ферритным чугунам в хладостойкости из-за повышенного содержания в них Si.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тодоров, Р. П. Структура и свойства ковкого чугуна / Р. П. Тодоров.- М.: Металлургия, 1974.- 160 с.
2. Болдырев, Д. А. Особенности получения отливок из ВЧШГ по технологии ковшевого модифицирования на основе «сэндвич»-процесса / Д. А. Болдырев // 6-я Всероссийская научно-практическая конференция «Литейное производство сегодня и завтра»: сб. тр. – СПб.: СПбГПУ, 2006.- С.95–99.
3. Болдырев, Д. А. Новые эффективные модификаторы и технологии модифицирования чугунов/ Д. А. Болдырев // Литейное производство. - 2006. - №12. - С. 9–13.
4. Болдырев, Д. А. Освоение новых модификаторов и технологий модифицирования для получения литых заготовок в чугунолитейном производстве ОАО «АвтоВАЗ» / Д. А. Болдырев // 2-й Литейный консилиум «Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из чёрных сплавов»: сб. тр. – Челябинск: ИЦМ, 2007. - С. -109–119.
5. Болдырев, Д. А. Контейнерная технология сфероидизирующего модифицирования ВЧШГ/ Д. А. Болдырев, Ю. П. Крючков // 6-я Всероссийская научно-практическая конференция «Литейное производство сегодня и завтра»: сб. тр. – СПб.: СПбГПУ, 2006. - С. 99–102.
6. Болдырев, Д. А. Освоение и внедрение технологии модифицирования «заливка сверху» для получения отливок из высокопрочного чугуна низких марок / Д. А. Болдырев // IV Международная научно-практическая конференция «Прогрессивные литейные технологии»: тр. конф.– М.: МИСиС, 2007. - С. - 66–71.
7. Болдырев, Д. А. Разработка и внедрение технологии ковшевого модифицирования «заливка сверху» для получения отливок из чугуна с компактным графитом низких марок / Д. А. Болдырев, С. В. Давыдов // Литейщик России. - 2008. - №8. - С. 27–29.
8. Болдырев, Д. А. Технологические особенности получения различных марок высокопрочного чугуна / Д. А. Болдырев // XI Съезд литейщиков России: тр. Съезда. – Екатеринбург: Уралвагонзавод, 2013. - С. - 33–38.

Материал поступил в редколлегию 28.04.15.