

A-PDF Image To PDF Demo. Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ**

Учебное пособие

Липецк
Липецкий государственный технический университет
2013

УДК 669.16(07)

С 253

Рецензенты: - кафедра теплофизики, автоматизации и экологии печей

ФМБТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

- д-р техн. наук, проф. В.Н. Гушин

Шипельников, А.А.

С 253 Свойства и область применения литейных конструкционных чугунов [Текст] : учеб. пособие / А.А. Шипельников, А.Н. Роговский, Т.В. Кравченко, Н.А. Бобылева. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013. – 81 с.

ISBN 978-5-88247-588-7

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту подготовки бакалавров по направлению 150400 «Металлургия».

Рассмотрена проблематика классификации литейных конструкционных чугунов по типу структуры, области применения и основным свойствам. Значительное внимание уделено морфологии графита и типу металлической основы в структуре различных марок чугунов, подробно рассмотрены области применения и их основные служебные свойства.

Предназначено для студентов 2-3 курсов металлургического института, изучающих дисциплины «Металлургические технологии 1», «Теория металлургических расплавов».

Табл. 23. Ил. 25. Библиогр.: 18 назв.

ISBN 978-5-88247-588-7

© Шипельников А.А., Роговский А.Н.,
Кравченко Т.В., Бобылева Н.А., 2013

© ФГБОУ ВПО «Липецкий
государственный технический
университет», 2013

Содержание

	Стр.
Введение.....	4
1. Определение, классификация и типы конструкционных чугунов в литейном производстве.....	5
2. Серый (обыкновенный) чугун.....	15
3. Ковкий чугун.....	27
4. Чугун с шаровидным графитом.....	34
5. Чугун с вермикулярным графитом.....	42
6. Чугуны специального назначения.....	46
7. Общее влияние химического состава на структуру и свойства чугунов.....	49
8. Общие технологические свойства литейных конструкционных чугунов.....	53
9. Количество и форма присутствия газов в чугунах.....	63
10. Сварка чугуна.....	70
11. Художественное литье из чугуна в России.....	74
12. Вопросы для самоконтроля.....	77
Библиографический список.....	79

Введение

Литейные конструкционные чугуны были и остаются основным конструкционным материалом современного машиностроения, а также изделий широкого потребления народного хозяйства. Качество конструкционных чугунов определяет не только уровень рентабельности литейного производства, но и соотношение «цена-качество» производимой заводом металлопродукции, начиная от декоративных скамеек и заканчивая специальными насосами АЭС.

В современных учебных пособиях, на наш взгляд, недостаточно полно изложена классификация литейных чугунов, а изучать самостоятельно справочники студенты в большинстве случаев не будут. Поэтому в данном учебном пособии лаконично и конструктивно представлена универсальная классификация чугунов с учетом типа микроструктуры, формы графита и химического состава, что вполне достаточно для получения первичных знаний и представлений о современном многообразии марок чугунов и их использовании для получения отливок и литых заготовок деталей механизмов и машин и прочих изделий. Значительная часть материала в пособии проиллюстрирована и прокомментирована в таблицах, схемах и графиках. Основная концепция учебного пособия заключается в формулировании и логическом выстраивании содержания глав таким образом, чтобы изучающему не требовалось прибегать к дополнительным источникам информации с целью осознания представленного материала.

Материал собран и систематизирован для максимально комфортного процесса самообучения, в том числе углубления имеющихся знаний и представлений о вопросах роли и свойств доменных чугунов, применяемых в современном сталеплавильном производстве, и в основном ориентирован на студентов старших курсов направления подготовки «Металлургия».

1. Определение, классификация и типы конструкционных чугунов в литейном производстве

Чугун – сплав железа с углеродом, содержание которого превышает 2,14%, а также другими элементами – кремнием, марганцем, серой, фосфором и пр. Промышленные чугуны следует рассматривать как многокомпонентный сплав на основе « $Fe - C - Si$ » с присутствием примесей других элементов.

Характерной особенностью чугунов является то, что углерод в сплаве может находиться не только в растворенном (феррит, аустенит) и связанном состоянии (карбиды типа цементита – Fe_3C), но также и в свободном состоянии (в форме пластинчатого, вермикулярного и шаровидного графита). Свободный углерод в чугуне в первом приближении представляет собой равномерно распределенные в металлической основе включения графита – *неметаллического материала, обладающего малой плотностью, прочностью и твердостью*. Связанный углерод входит в состав чугуна в виде химического соединения – цементита. При этом форма выделения графита и структура металлической основы (матрицы) определяют основные типы чугунов и их свойства.

В настоящее время чугун является наиболее распространенным материалом для изготовления фасонных отливок в общем и специальном машиностроении. Это объясняется оптимальным сочетанием технологических (литейных, обрабатываемости резанием и пр.), эксплуатационных, механических свойств и технико-экономических показателей технологий и процессов производства деталей механизмов и машин и товаров широкого потребления из различных марок чугунов.

За многие сотни лет до появления стали в качестве конструкционного материала, чугун использовался в земледелии (серпы, мотыги), а также в быту и для ритуальных целей. На Востоке в древности из чугуна отливали колокола, огромные скульптуры и мелкие монеты. Pig-iron (англ.),

Schweineeisen (нем.) – «свиное железо», а в русском языке закрепилось слово «чушка», обозначающее брусок металла отлитого в открытую сверху форму. Первоначально «pig-iron» называли получавшийся одновременно с железной крицей нежелательный хрупкий материал, считавшийся отходом производства – чугу́н (Средние века). Позже заметили, что он обладает хорошими литейными свойствами, и из него стали отливать пушки, ядра, архитектурные украшения (в России начало широкого применения чугуна приходится на середину XVI – начало XVII в.в.). На границе XIX – XX веков «чушками» стали называть чугунные слитки, которые использовали для переплава на сталь. Это название сохранилось до сих пор.

Общепринятая классификация литейных чугунов. Классификация чугунов осуществляется по следующим признакам:

1) по состоянию углерода (свободный или связанный): серый, белый чугу́н, половинчатый (отбеленный);

2) по виду включений графита: пластинчатый графит (ПГ), вермикулярный (ВГ), шаровидный (ШГ), компактный (КГ) – *разновидность шаровидного неправильной формы;*

3) по типу структуры металлической основы (матрицы): ферритный, перлитный, аустенитный, бейнитный, мартенситный и трооститный чугуны; имеются также чугуны со смешанной структурой: ферритно-перлитный и перлитно-карбидный;

4) по химическому составу: нелегированные чугуны (общего назначения) и легированные чугуны (специального назначения).

Классификация структурных составляющих чугуна в РФ производится по ГОСТ 3443-87 по форме графита и по типу металлической матрицы. При оценке графита определяются: форма, распределение, количество и размер включений графита; при оценке матрицы – тип структуры, количество перлита (П) и феррита (Ф), дисперсность перлита, строение, распределение,

размер ячеек сетки и отдельных включений фосфидной эвтектики (ФЭ), количество и размер включений цементита (Ц) или ледебурита (Л).

Схемы структуры различных видов чугунов приведены на рис. 1.

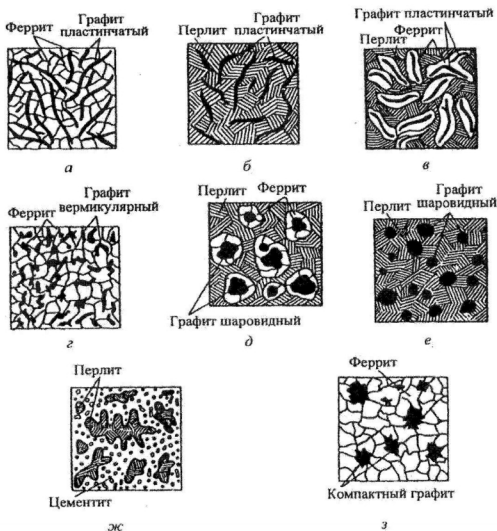


Рис. 1. Основные схемы микроструктуры чугунов (x100):

а, б, в – серый чугун (СЧ) с пластинчатой формой графита; г – чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ); д, е – высокопрочный чугун (ВЧ) с шаровидным графитом; ж – белый чугун (БЧ); з – ковкий чугун (КЧ) с компактной формой графита

Структура чугуна может состоять из смеси феррита (Ф) – твердого раствора углерода в железе, цементита (Ц) – химического соединения железа

и углерода, перлита (П) – механической смеси цементита (Ц) и феррита (Ф), а также графита (Гр). В перлите всегда содержится 0,8% углерода, а в цементите около 6,67% углерода. *Следует подчеркнуть, что фазами чугунов при нормальных условиях могут являться: феррит (раствор внедрения C в α -Fe, углерода около 0,01%), аустенит (раствор внедрения C в α -Fe, углерода около от 2,14% при температуре 1147⁰С и 0,8% при 727⁰С), мартенсит (пересыщенный раствор C в α -Fe с деформацией решетки последнего), цементит, графит различной морфологии. Структурные составляющие: перлит, тростит, сорбит, бейнит, ледебурит – механическая смесь феррита и цементита различной степени дисперсности в зависимости от скорости охлаждения и содержания углерода.*

Морфологические параметры развития *структурных составляющих и в особенности фаз* предопределяют весь комплекс свойств чугунов (табл. 1).

Таблица 1

Приближенное позиционирование чугунов по структуре и свойствам

Тип чугуна по металлической основе	Шифр структуры	Место по свойствам*		
		прочность	твёрдость	вязкость
Перлито-карбидный (белый)	П-Ц	IV	I	V
Аустенитный	А-Гр	II	III	I
Перлитный	П-Гр	I	II	IV
Ферритно-перлитный	Ф-П-Гр	III	IV	II
Ферритный	Ф-Гр	V	V	III
*условное место: чем выше цифра, тем ниже реальный параметр				

При одинаковой металлической основе различных по химическому составу и способу модифицирования чугунов (например, перлитная матрица в СЧ-30 и ВЧ-30 или аустенитная матрица в ЧН15Д7 и ЧН16Д7ГХШ) решающим фактором влияния на комплекс свойств будет морфология включений графита (см. рис. 2).

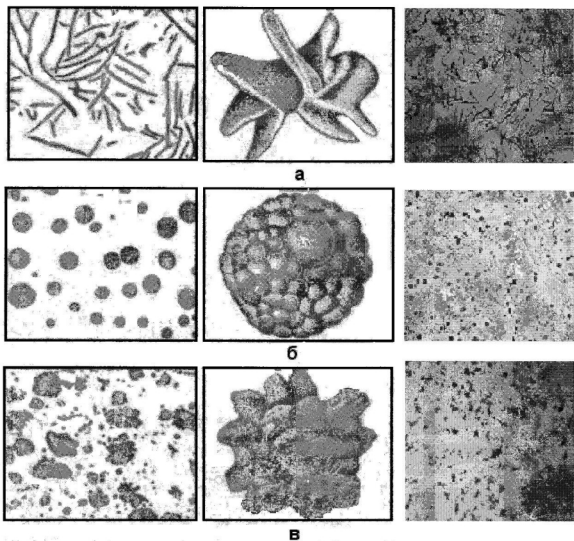


Рис. 2. Схемы, модели и реальные фотографии включений графита в структуре:

а – пластинчатый, б – шаровидный и в – вермикулярный графит

С точки зрения повышения пластичности, вязкости и прочности структуры форму включений графита с некоторым допущением можно

ранжировать следующим образом (от минимального до максимального значения): *пластинчатая* → *вермикулярная* → *шаровидная*.

В равновесных условиях кристаллизации и охлаждения структуры от температуры заливки литейных форм и до комнатной температуры формирование структурных составляющих подчиняется стабильной (система «железо–углерод») и метастабильной (система «железо–цементит») диаграмме состояния. Так как без модифицирования обычно формируются фазы – феррит и цементит (например, при заливке в кокиль немассивных отливок простой конфигурации), то обычно для описания изменений структуры в зависимости от содержания углерода и температуры пользуются метастабильной диаграммой состояния «Fe-C» (см. рис. 3).

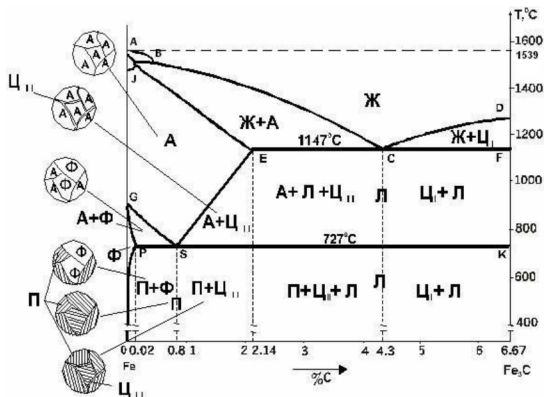


Рис. 3. Метастабильная диаграмма состояния «Fe-C»

Некоторые комментарии к диаграмме состояния. Как видно из рис. 3, при кристаллизации чугуна с заэвтекктическим составом (углерода больше 4,3%, меньше 6,67%) из расплава первичной фазой выделения будет цементит

(Ц I). Далее состав сплава по мере протекания процесса кристаллизации меняется по кривой CD до тех пор, пока содержание углерода не достигнет эвтектического значения - 4,3%, а температура расплава снизится до 1147⁰C. В точке С диаграммы оставшаяся жидкость (Ж) начнет кристаллизоваться с формированием механической смеси сразу двух фаз – аустенита и цементита – образуется ледебурит (Л), схема строения которого в присутствии избытка первичного цементита представлена на рис. 4.

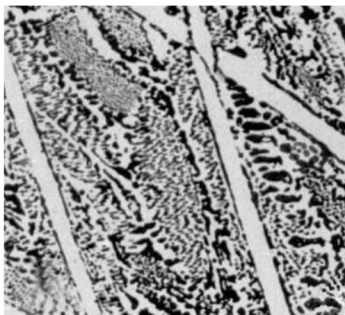


Рис. 4. Схема строения ледебурита: светлые полосы – игольчатый цементит; темно-серое поле – собственно ледебурит; «черные объекты» внутри ледебурита – «части» (оси) дендритов аустенита (превращенного)

Из аустенита и ледебурита выделяется вторичный цементит – Ц II, при этом состав аустенита по углероду изменяется по кривой SE. Состав и первичного, и вторичного цементита не изменяется и соответствует вертикальной линии FK – около 6,67% C. При охлаждении кристаллизованной структуры до температуры 727⁰C происходит распад аустенита на механическую смесь двух фаз: феррита и цементита – образуется перлит (П). Если состав чугуна эвтектический, то в структуре при комнатной температуре будет ледебурит (с превращенным аустенитом и первичным цементитом), если доэвтектический (2,14-4,3% C) – перлит,

вторичный цементит и ледебурит (П+Ц П+Л), если заэвтектический – первичный цементит и ледебурит (Ц I+Л).

Таким образом, в теории кристаллизации чугунов всё просто – достаточно знать химический состав и можно предсказать структуру сплава, а, следовательно, спрогнозировать его основные свойства в литых заготовках.

Разумеется, в реальном промышленном чугуне всегда присутствуют некоторое количество *иных элементов*, оказывающих влияние на кристаллизацию (через «искажение» и изменение положения характеристических кривых диаграммы BC, CD, ES, а также прямых SK и EF, см. рисунок 3): кремний, марганец, сера и фосфора, а также «добрая часть» микроэлементов из таблицы Менделеева – ванадий, вольфрам, молибден, олово, цинк, свинец и т.п., что главным образом определяется химическим составом применяемых в шихте доменных чугунов (табл. 2).

Таблица 2

Средний химический состав серийных чугунов

Марка чугуна	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Cu	B	Ce
СЧ10	3,72	2,03	0,017	0,05	0,66	0,13	0,03	0,69*	0,004	0,002
ЧН15Д7	2,66	2,01	0,012	0,04	1,11	16,43*	2,09	6,46*	0,001	0,001
*специальное легирование										

Учесть влияние всех элементов (естественных примесей и случайных микроэлементов) на характер протекания кристаллизации невозможно, однако влияние химического состава обычного серого чугуна (СЧ) достаточно точно оценивается по величине углеродного эквивалента (C_2) – расчетная величина, которая дает представление о характере кристаллизации сплава путем учета содержания основных элементов. Углеродный эквивалент с достаточной степенью достоверности аппроксимирует реальный химический состав с поведением сплава при охлаждении по стабильной

двойной системе «Fe-C». Углеродный эквивалент чугуна, с учетом содержания основных элементов, рассчитывается по формуле Н.Г. Гиршовича:

$$C_e = C\% + 0,33 \cdot (Si\% + P\% - Mn\%), \quad (1)$$

где: $C\%$, $Si\%$, $P\%$, $Mn\%$ - содержание углерода, кремния, фосфора и марганца в процентах по массе.

Соответственно, для серых чугунов с большой степенью эвтектичности величина C_e составляет 4,3-4,4 %, например, марка СЧ10; для чугунов с малой степенью эвтектичности – менее 3,6-3,7% – марка СЧ35. Углеродный эквивалент, помимо изменения в структуре твердых чугунов, позволяет спрогнозировать изменение, в первую очередь, литейных (жидкотекучесть, склонность к усадке) и механических свойств (твердость, сопротивление разрыву).

Ниже представлены результаты статистической обработки базы данных одного из машиностроительных предприятий Липецкой области на предмет выявления взаимосвязи между приведенным химическим составом и твердостью чугунных отливок (период 2006-2008 гг., 51 плавка из 500, рис. 5, константа уравнения ноль, что нарушает принцип Гаусса-Маркова для «прогнозных математических моделей», однако в случае строго заданных условиях производства допустимо). Кроме углеродного эквивалента введено понятие константы графитизации – расчетно-эмпирическая величина, позволяющая оценить склонность состава чугуна к графитизации (то есть к выделению углерода в форме включений графита, а не цементита) в период первичной (фигура, образованная линиями диаграммы BC-CD-EF, см. рис. 3) и вторичной (фигура, образованная линиями диаграммы EF-ES-SK, см. рис. 3) кристаллизации. Полином уравнения констант графитизации отличается от уравнения 1 (углеродного эквивалента) только введением дополнительных членов, учитывающих содержание таких элементов как медь, никель, сера и хром, и применяется в основном для анализа состава специальных легированных чугунов (например, чугун аустенитного класса – «нирезист»).

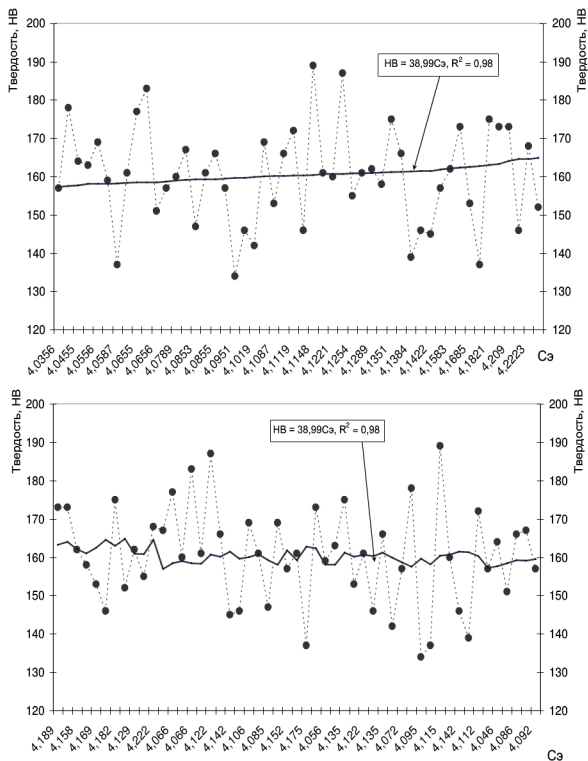


Рис. 5. Зависимость твердости HB от эвтектичности C_3 :
сверху – без сортировки по C_3 ; снизу – с сортировкой по C_3 (от min до max C_3)

2. Серый (обыкновенный) чугун

Серый чугун (СЧ) – это чугун с пластинчатым графитом, являющийся на сегодняшний день основным литейным сплавом в общем машиностроении. Промышленное значение серого чугуна обусловлено его хорошими литейными качествами, позволяющими получать недорогие отливки разнообразной конфигурации, а также приемлемыми физико-механическими свойствами.

Потребители отливок из серого (обыкновенного) чугуна - практически все отрасли машиностроения (автомобильная, сельскохозяйственная, станкостроение и др.) и народного хозяйства (декоративные решетки, скамейки в парке, запорная арматура и т.п.). Особенностью микроструктуры серого чугуна является наличие пластинчатого графита, который нарушает *в первом приближении сплошность металлической основы*. Именно по этой причине СЧ имеет сравнительно невысокие значения временного сопротивления разрыву и очень низкую пластичность. С другой стороны, *именно благодаря пластинчатому графиту* в сером чугуне уникально сочетаются хорошие антифрикционные свойства, высокая износостойкость, малая чувствительность к концентраторам напряжений при относительно невысокой твердости поверхности. СЧ также имеет высокую демпфирующую способность. Этот материал обладает высокими литейными свойствами: хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к образованию усадочных дефектов и общей ликвации по сравнению с чугунами других типов. Обычно изготавливают отливки самой сложной конфигурации с толщиной стенок от 4 до 500 мм.

В основу стандартизации серого чугуна положен *принцип регламентирования минимально допустимого значения временного сопротивления разрыву при растяжении σ_B* . Марки, механические свойства и химический состав СЧ по ГОСТ 1412, ИСО 185 и национальным стандартам некоторых стран приведены в таблицах 3-5.

Согласно ГОСТ 1412-85 для изготовления отливок предусматриваются следующие марки чугуна: шесть основных СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35 и три дополнительных по требованию потребителя: СЧ18, СЧ21 и СЧ24. Условное обозначение марки включает буквы СЧ – серый чугун и цифровое обозначение величины минимального временного сопротивления при растяжении в МПа 10^{-1} .

Пример условного обозначения: СЧ20 ГОСТ 1412-85.

Таблица 3

Отечественные марки серого чугуна, имеющие зарубежные аналоги

Стандарты	Марки серого чугуна							
Россия, ГОСТ 1412-85	СЧ10	СЧ15	СЧ18	СЧ20	СЧ24	СЧ25	СЧ30	СЧ35
ИСО 185	100	150	-	200	-	250	300	350
Великобритания, BS 1452	100	150	180	200	220	250	300	350
Германия, DIN 1691	GG-10	GG-15	-	GG-20	-	GG-25	GG-30	GG-35
США, ASTM A 48	20B	25B	-	30B	-	35B	45B	50B
Япония, JIS G 5501	FC 100	FC 150	-	FC 200	-	FC250	FC300	FC 350

Таблица 4

Механические свойства основных марок чугунов по ГОСТ 1412-85

Марка чугуна	Толщина стенки, мм	Отдельно отлитая проба МПа, не менее	Твердость, НВ
1	2	3	4
СЧ10	4	140	205
	8	120	200
	15	100	190
	30	80	185
	50	75	156
	80	70	149
	150	65	120
СЧ15	4	220	241
	8	180	224
	15	150	210
	30	110	201
	50	105	163
	80	90	156
	150	80	130
СЧ20	4	270	255
	8	220	240
	15	200	230
	30	160	216
	50	140	170
	80	130	163
	150	120	143
СЧ25	4	310	260
	8	270	255
	15	250	245
	30	210	238
	50	180	187
	80	165	170
	30	260	250
	50	220	197
	80	195	187
	150	180	163

Окончание таблицы 4

1	2	3	4
СЧ35	4	380	290
	15	350	275
	30	310	270
	50	260	229
	80	225	201
	150	205	179

Таблица 5

Химический состав серого чугуна по ГОСТ 1412 и ASTM A 48 (США)

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	P	S
				не более	
ГОСТ 1412-85					
СЧ10	3,5...3,7	2,2...2,6	0,5...0,8	0,3	0,15
СЧ15	3,5...3,7	2,0...2,4	0,5...0,8	0,2	0,15
СЧ20	3,3...3,5	1,4...2,4	0,7...1,0	0,2	0,15
СЧ25	3,2...3,4	1,4...2,2	0,7... 1,0	0,2	0,15
СЧ30	3,0...3,2	1,3...1,9	0,7...1,0	0,2	0,12
СЧ35	2,9...3,0	1,2...1,5	0,7...1,1	0,2	0,12
ASTM A 48					
20B	3,4...3,7	2,3...2,8	0,5...0,8	0,25	0,12
25B	3,2...3,5	2,0...2,4	0,6...0,9	0,20	0,15
30B	3,1...3,4	1,9...2,3	0,6...0,9	0,15	0,15
35B*	3,0...3,3	1,8...2,2	0,6...0,9	0,15	0,12
* массовая доля прочих элементов: Ti = 0,055; Cu = 0,55; Cr = 0,3...0,6; Ni = 0,2...0,5 %					

Механические свойства СЧ обеспечиваются в литом состоянии или после термической обработки.

Поскольку значения прочности чугуна данной марки в отливке зависят от скорости охлаждения, определяемой толщиной стенки (диаметром) отливки, в стандартах (см. табл. 3) приводятся минимальные значения σ_B в отдельно отлитых пробных заготовках других диаметров или сечений из СЧ каждой марки.

Международный стандарт ИСО 185 включает шесть классов, устанавливаемых на основании результатов механических испытаний на растяжение образцов, вырезанных из различных литейных проб.

Характерным показателем, определяющим марку чугуна, является временное сопротивление при растяжении σ_B образцов из отдельно отлитых цилиндрических проб диаметром 30 мм. Для отливок массой более 200 кг испытания могут быть произведены на приливных пробах (см. табл. 3).

В ИСО 185 для руководства при проектировании конструкций и изделий, исключительно в качестве информации, приведены данные по ожидаемым механическим свойствам при растяжении для материала отливок. По согласованию между изготовителем и заказчиком значения σ_B могут быть обязательными. По ИСО 185 буквенные обозначения в марках чугунов не применяют. В случаях, когда наиболее существенной характеристикой является твердость чугуна, можно пользоваться рекомендациями, приведенными в табл. 6.

По стандарту Германии DIN 1691 в заказе на отливки должно быть однозначно указано: является ли характерным свойством временное сопротивление при растяжении или твердость по Бринеллю. От этого зависит маркировка, например: *чугун DIN 1691-GG-25* или *чугун DIN 1691-GG-210 HB*.

Буквы GG означают соответственно «gegossen» – отливо и «gubeisen» – чугун.

Данные о временном сопротивлении при растяжении, приведенные в табл. 4, являются гарантированными в отливках. Связь между толщиной стенки (2,5-80 мм) и твердостью отливки из различных марок СЧ представлена в DIN 1691 в регламентированном виде, что позволяет правильно и точно устанавливать твердость для заданного интервала толщин стенок отливок (таблица 7).

Таблица 6

Классы твердости серого чугуна по ИСО 185

Класс твердости	Пределы изменения твердости HB	Класс твердости	Пределы изменения твердости HB
H 145	170 max	H 215	190-240
H 175	150-200	H 235	210-260
H 195	170-220	H 255	230-280

Таблица 7

Твердость по Бринеллю отливок из серого чугуна по DIN 1691

Марка чугуна*	Толщина стенки, мм	Твердость по Бринеллю HB**	
		минимум	максимум
1	2	3	4
GG-150HB	2,5-5	-	210
	5-10	-	185
	10-20	-	170
	20-40	-	160
	40-80	-	150
GG-170HB	2,5-5	170	260
	5-10	140	225
	10-20	125	205
	20-40	110	185
	40-80	100	170
GG-190HB	4-5	190	275
	5-10	170	260
	10-20	155	230
	20-40	135	210
	40-80	120	190

1	2	3	4
GG-220HB	5-10	200	275
	10-20	180	250
	20-40	160	235
	40-80	145	220
GG-240HB	10-20	200	275
	20-40	180	225
	40-80	165	240
GG-260HB	20-40	200	275
	40-80	185	260

*в марке чугуна указаны значения твердости, соответствующие стенке отливки толщиной 15 мм, кроме GG-260HB

**интервал твердости годен только для указанной области толщин стенок. Интервал твердости может быть уже, но разница должна быть не менее 40 HB

В приложении к стандарту DIN 1691 представлены зависимости временного сопротивления при растяжении σ_B от твердости HB (см. рис. 6) и толщины S стенки отливки (см. рис. 7), а также твердости HB от толщины стенки отливки (см. рис. 8).

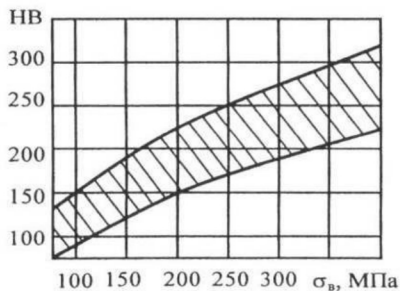


Рис. 6. Зависимость временного сопротивления σ_B от твердости HB

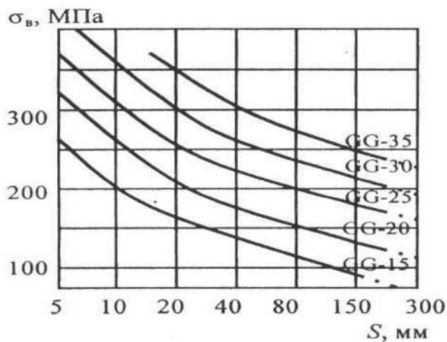


Рис. 7. Соотношение между прочностью σ_B и толщиной S стенки отливки из чугуна различных марок

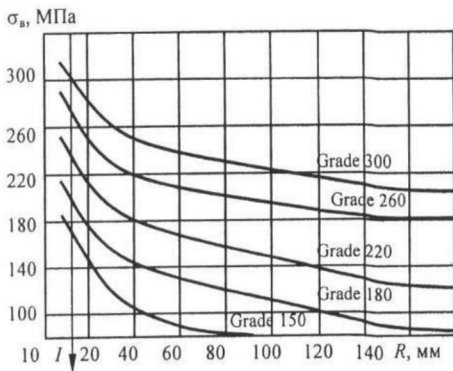


Рис. 8. Соотношение между прочностью σ_B и толщиной поперечного сечения R отливок из чугуна разных марок по BS 1452:

I - эквивалент, равный пробе диаметром 30 мм

Стандарт США ASTM A 48 включает девять марок серого чугуна. Условное обозначение марки имеет цифровое обозначение и букву В. Число определяет временное сопротивление разрыву (фунт/дюйм²), например: 20B ASTM A 48.

Стандарт Японии JIS G 5501 включает шесть марок серого чугуна. Условное обозначение марки состоит из букв FC и цифрового обозначения минимального временного сопротивления при растяжении, в МПа·10⁻¹, например: FC 25 JIS G 5501.

Механические свойства серого чугуна, обеспечивающие долговечность и надежность изделия, не предусмотренные ГОСТ 1412-85 и приведенные в приложении национальных стандартов, даны в табл. 8. Физические свойства серого чугуна по ГОСТ 1412-85 даны в табл. 9.

Таблица 8

Механические свойства серого чугуна, не предусмотренные ГОСТ 1412-85 и приведенные в приложениях к некоторым национальным стандартам

Марка чугуна	σ_{HT} , МПа	$\sigma_{СЖ}$, МПа	τ_{φ} , МПа	KC , кДж/м ²	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	σ_{-1}^{HT} , МПа	$K_{I\sigma}$, МПа·м ^{1/2}
1	2	3	4	5	6	7	8
ГОСТ 1412-85							
СЧ10	280	530	110	-	70-110	-	-
СЧ15	350	650	150	10	70-110	70	10
СЧ20	420	800	200	20	85-110	90	15
СЧ25	490	950	250	40	90-110	110	20
СЧ30	560	1100	300	60	125-145	140	25
СЧ35	630	1250	350	80	130-160	160	25
DIN 1691							
GG-15	250	600	170	-	78-103	70	10
GG-20	290	720	230	-	88-113	90	13
GG-25	340	840	290	-	103-118	120	15
GG-30	390	960	345	-	108-137	140	18
GG-35	490	1080	400	-	123-143	145	20

Окончание таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8
BS 1452							
150	-	600	173	-	100	68	-
180	-	672	207	-	109	81	-
220	-	768	253	-	120	99	-
260	-	869	299	-	128	117	-
300	-	960	345	-	135	136	-
350	-	1080	403	-	140	145	-
400	-	1200	460	-	145	152	-

Таблица 9

Физические свойства серого чугуна по ГОСТ 1412-85

Марка чугуна	Плотность ρ , кг/м ³ ·10 ⁻³	Линейная усадка ε , %	Модуль упругости при растяжении $E \cdot 10^{-2}$, МПа	Удельная теплоемкость при температуре 20...200°С c , Дж/(кг·К)	Коэффициент линейного расширения при температуре 20...200°С α , 1/°С·10 ⁶	Теплопровод- ность при 20 °С λ , Вт/(м·К)
СЧ10	6,8	1,0	700-1100	460	8,0	60
СЧ15	7,0	1,1	700-1100	460	9,0	59
СЧ20	7,1	1,2	850-1100	480	9,5	54
СЧ25	7,2	1,2	900-1100	500	10,0	50
СЧ30	7,3	1,3	1200-1450	525	10,5	46
СЧ35	7,4	1,3	1300-1550	545	11,0	42

В большинстве национальных стандартов на серый чугун, регламентирующих механические свойства, химический состав чугунов не оговаривается, кроме стандартов России и США.

Для снятия литейных напряжений в структуре отливок и улучшения их свойств применяются следующие виды термической обработки: закалка, нормализация, отжиг (низкотемпературный, нормальный и высокотемпературный), термоудар, низкотемпературная тепловая обработка (при 200-300°С).

Область применения СЧ в зависимости от марки представлена в табл. 10.

Таблица 10

Области применения серого чугуна

Марка чугуна	Область применения
СЧ10	Секции отопительных радиаторов, котлов и гарнитура к ним, ванны, трубы, раковины и другие отливки сантехнического назначения (толщина стенок 4 - 8 мм)
СЧ15	Станины электродвигателей облегченной конструкции с многочисленными ребрами, выпускные тонкостенные коллекторы (3 - 7 мм), картеры и детали компрессора автомобиля массой до 20 кг и толщиной стенки 5...8 мм, диски сцепления, тормозные барабаны, коллекторы массой до 30 кг (5 - 25 мм)
СЧ18	Слабо нагруженные детали станкостроения: подmotorные плиты, рычаги управления, шкивы, корпуса, кожухи, патрубки, грузы
СЧ20	Блоки, головки, картеры массой до 90 кг (10 - 25 мм) автомобилей и тракторов, тормозные диски дизелей средней нагруженности, выпускные коллекторы массой до 100 кг (5 - 30 мм). В деталях станкостроения: фланцы, корпуса, крышки (15 - 50 мм)
СЧ21	Детали ходовой части и двигателей средненагруженных автомобилей и тракторов. Не особенно ответственные детали корпусов станков, компрессоров, насосов и холодильных машин
СЧ24	Маховики, головки и блоки цилиндров, корпусные детали, кронштейны, гильзы цилиндров массой до 100 кг (8 - 30 мм) дизелей
СЧ25	Сложные отливки, работающие при высоких температурах и давлении: маховики, крышки коренных подшипников, головки и блоки цилиндров карбюраторных двигателей, тормозные барабаны, диски и нажимные диски сцепления в автомобильной и тракторной промышленности. Станочные отливки (кронштейны, салазки) массой до 300 кг (30 - 60 мм)
СЧ30	Распределительные валы дизелей и карбюраторных двигателей, массивные отливки быстроходных дизелей, запорная арматура, работающая при повышенном давлении. Гильзы цилиндров, поршни и другие ответственные детали тепловозных дизелей. Базовые, корпусные и другие детали высокой прочности для станкостроения (30 - 60 мм). Корпуса распределителей, детали насосов и компрессоров
СЧ35	Особо ответственные износостойкие станочные отливки (60 - 100 мм)

Таким образом, химический состав, свойства и области применения обыкновенного серого чугуна весьма разнообразны. Отметим, что получение всех вышеперечисленных марок в условиях современных литейных цехов

осуществляется, как правило, в индукционных среднечастотных печах, методом переплава легированных отходов (возврат производства – брак, элементы литниково-питающей системы – ЛПС) или методом сплавления доменных чушковых чугунов с некоторым количеством стального лома (5 – 10%) и добавлением ферросплавов (ферромарганец, ферросилиций) для корректировки химического состава.



Рис. 9. Фотографии различных изделий из СЧ:

а – фасонное корпусное литьё; *б* – элемент запорной арматуры;
в – спортивная гиря

Перед заливкой форм серый чугун обычно модифицируют (непосредственно в заливочном ковше, в момент выпуска плавки или перелива из раздаточного ковша). Это проводится с целью улучшения параметров микроструктуры (ввиду малого количества вводимой добавки модифицирование практически не меняет химический состав чугуна) и получения заданных свойств отливок из СЧ непосредственно в литом состоянии, без применения термической обработки. Фотографии некоторых видов изделий из СЧ представлены на рис. 9.

3. Ковкий чугун

Ковким называется чугун с хлопьевидным (компактным) графитом, получаемый путем отжига белого чугуна определенного химического состава. Особенностью микроструктуры ковкого чугуна (КЧ), определяющей его свойства, является наличие компактных включений графита – «углерода отжига», благодаря которым ковкий чугун имеет высокие прочность и пластичность.

В основу стандартизации ковкого чугуна по ГОСТ 1215-79 положен принцип регламентирования минимально допустимых значений временного сопротивления разрыву при растяжении σ_B , относительного удлинения σ и твердости HB .

В зарубежных стандартах регламентируется также минимально допустимое значение предела текучести $\sigma_{0,2}$. В зависимости от состава микроструктуры металлической основы ковкий чугун делят на ферритный (Φ) и перлитный ($П$) классы. По ГОСТ 1215-79 отливки изготавливают из ковкого чугуна следующих марок:

1) КЧ 30-6; КЧ 33-8; КЧ 35-10; КЧ 37-12 ферритного класса, характеризующегося ферритной или ферритно-перлитной микроструктурой металлической основы;

2) КЧ 45-7; КЧ 50-5; КЧ 55-4; КЧ 60-3; КЧ 65-3; КЧ 70-2; КЧ 80-1,5 перлитного класса, характеризующегося в основном перлитной микроструктурой металлической основы.

Схемы и фотографии структуры КЧ представлены на рис. 10.

В РФ ГОСТ 1215-79 распространяется на отливки из ковкого чугуна, изготовленного из белого чугуна и подвергнутого термической обработке с целью получения необходимых механических свойств и микроструктуры, состоящей из феррита и перлита в различных соотношениях и углерода отжига. Условное обозначение включает буквы КЧ – ковкий чугун и два

числа. Первое двузначное число показывает минимальное значение временного сопротивления при растяжении в кгс/мм² (МПа), второе – минимальное значение относительного удлинения в процентах.

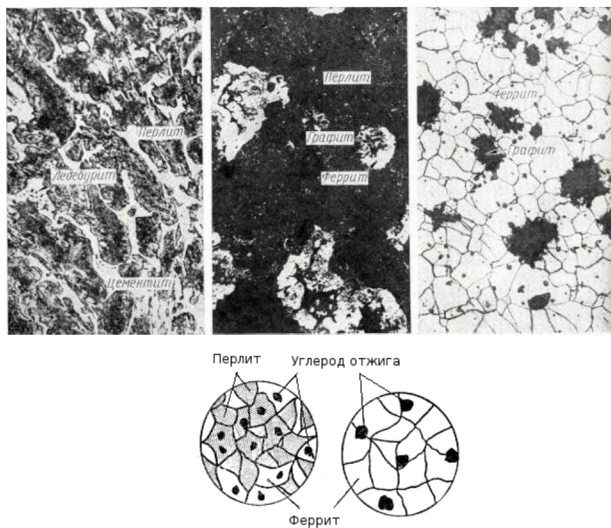


Рис. 10. Микроструктура (сверху, $\times 100$) и схема структуры (снизу) ковкого чугуна с различной металлической основой

Примеры условных обозначений ковкого чугуна по ГОСТ 1215-79.

Отливка из ковкого чугуна марки КЧ 30-6 ферритного класса:

Отливка КЧ30-6-Ф ГОСТ 1215-79.

Отливка из ковкого чугуна марки КЧ 60-3 перлитного класса:

Отливка КЧ 60-3-П ГОСТ 1215-7

Основные марки зарубежных аналогов ковкого чугуна приведены в табл. 11.

Таблица 11

Марки ковкого чугуна и их зарубежные аналоги

Россия	США	Германия	Япония	Франция	Велико- британия
ГОСТ 1215	ASTM A 47 A 602	DIM 1692	JIS G 5702 G 5703 G 5704	NF A 32 A 32-701 A 32-702	BS 6681
КЧ 30-6	-	-	FCMB 270	-	B 30-06
КЧ 33-8	22010	GTW-35-04	FCMB 310	-	B 32-10
КЧ 35-10	M3210	GTS-35-10	FCMB 340	MN 350-10	B 35-12
КЧ 37-12	24018	GTW-S-38-12	FCMB 360	MB 380-12 MN 380-18	W 38-12
КЧ 45-7	M4504	GTS-45-06	FCMWP 440 FCMP 440	MN 450-6	W 45-7
КЧ 50-5	M5003	GTW-45-07	FCMWP 490 FCMP 490	-	P 50-05
КЧ 55-4	M5503	GTS-55-04	FCMWP 540 FCMP 540	MN 550-4	P 55-04
КЧ 60-3	-	-	FCMP 590	-	P 60-03
КЧ 65-3	M7002	GTS-65-02	-	MN 650-3	P 65-02
КЧ 70-2	-	GTS-70-02	FCMP 690	MN 700-2	P 70-02
КЧ 80-1,5	M8501	-	-	-	-

В стандарте ASTM A 602 (США), например, в марке M7002 буква M означает malleable – ковкий, 70 – σ_B в кгс/мм², 02 – относительное удлинение в %, а в стандарте на отливки из ферритного ковкого чугуна ASTM A 47 приведены две марки 22010 и 24018, где 220 и 240, соответственно, показатели предела текучести $\sigma_{0,2}$ в МПа, а 10 и 18 – относительное удлинение δ в %.

В стандартах Японии на отливки из ковкого чугуна марки обозначают только по σ_B , в остальных странах – по σ_B и δ , причем в Германии и Великобритании σ_B в кгс/мм², а в Японии и Франции – в МПа.

В стандарте DIN 1692 (Германия) буквы GTS обозначают отоженный ковкий чугун без обезуглероживания, а GTW – обезуглероженный отоженный ковкий чугун.

Стандарт JIS G 5702 (Япония) регламентирует свойства черносердечных ковок чугунов, обозначаемых буквами FCMB – *foundry casting malleable black-heart*, JIS G 5703 – FCMW, буква W означает *white-heart* (белосердечный, он же обезуглероженный), причем три последние марки дополнены буквой P, что означает perlite (перлитный). В стандарте JIS G 5704 – FCMP P означает то же самое.

Стандарт NF A 32-701 (Франция) оговаривает марки белосердечного ковкого чугуна, которые обозначаются буквами MB – *malleable blanc*, а стандарт NF A 32-702 отливки из ковкого чугуна с шаровидным графитом, ферритного и перлитного чугунов маркирует буквами MN, где N означает *nodulaire* – шаровидный.

В стандарте BS 6681 (Великобритания) классы ковкого чугуна, входящие в область распространения данного стандарта, обозначаются следующим образом: W – белосердечный (обезуглероженный) ковкий чугун, B – черносердечный (ферритный) ковкий чугун, P – перлитный ковкий чугун.

Свойства ковкого чугуна. Химический состав и механические свойства ковкого чугуна (ферритного класса) согласно стандартов России и США приведен в табл. 12 и 13.

Таблица 12

Химический состав ковкого чугуна ферритного класса для отливок по ГОСТ 1215-79 и стандартам США

Группа марок	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	C + Si	Mn	P _{н.б.}	S _{н.б.}	Cr _{н.б.}
КЧ 30-6; КЧ 33-8	2,6-2,9	1,0-1,6	3,7-4,2	0,4-0,6	0,18	0,20	0,08
22010; КЧ 35-10	2,5	1,32	-	0,43	0,024	0,159	0,029
М 3210 КЧ 37-12 24018	2,2-3,9 2,4-2,7 2,16-2,29	0,9-1,9 1,2-1,4 1,01-1,17	- 3,6-4,0 -	0,15-1,25 0,2-0,4 0,35-0,38	0,02-0,15 0,12 0,11-0,16	0,02-0,2 0,06 0,08-0,1	0,06 0,06 0,02

Таблица 13

Механические свойства ковкого чугуна для отливок

Стандарт	Марка чугуна	Размер, мм	HB	σ_B МПа	σ_T МПа	δ , %
ГОСТ 1215-79	КЧ 30-6	16	100...163	294	-	6
JIS G 5702	FCMB 270	12-14	163	270	165	5
BS 6681	B 30-06	12-15	150	300	-	6
ГОСТ 1215-79	КЧ 33-8	16	100-163	323	-	8
ASTM A 47	22010	12,5-16	156	340	220	10
DIN 1692	GTW-35-04	9	230	340	-	5
		12	230	350	-	4
		15	230	360	-	3
JIS G 5702	FCMB 310	12-14	163	310	185	8
BS 6681	B 32-10	12-15	150	320	190	10
ГОСТ 1215-79	КЧ 35-10 M3210 GTS-35-10 FCMB 340 MN 350-10 B 35-11	16	100-163	333	-	10
ASTM A 602		19	156	343	221	10
DIN 1692		12-15	150	350	200	10
JIS G 5702		12-14	163	340	205	10
NF A 32		15	150	350	230	10
BS 6681		12-15	150	350	200	12
ГОСТ 1215-79		16	110-163	362	-	12

Области применения отливок из ковкого чугуна. Области применения отливок из ковкого чугуна являются: различные сферы промышленности и народного хозяйства РФ автомобильное, тракторное и сельскохозяйственное машиностроение, станкостроение; вагоностроение, санитарно-строительное оборудование и др. Приоритетная область применения КЧ в зависимости от марки представлена в табл. 14.

Таблица 14

Области применения отливок из ковкого чугуна

Марка чугуна	Область применения
1	2
КЧ 30-6	Санитарно-техническое и строительное оборудование: арматура и фитинги, работающие при невысоких температуре и давлении
КЧ 33-8	Тракторное и сельскохозяйственное машиностроение: шестерни, муфты, храповики, рычаги, звездочки. Вагоностроение и судостроение: детали воздушных тормозов. Санитарно-техническое и строительное оборудование: фитинги, арматура, угольники
КЧ 35-10	Автомобилестроение: картеры, ступицы колес, кронштейны двигателя, рессор. Тракторное и сельхозмашиностроение: собачки, ступицы, вилки валов, катки, кронштейны. Вагоностроение и судостроение: детали воздушных тормозов, кронштейны, скобы. Станкостроение: втулки, вилки. Санитарно-техническое и строительное оборудование: радиаторные нишпели, кронштейны, пневмокорпусы
КЧ 37-12	Автомобилестроение: тормозные колодки, накладки, балансиры, катки, барашки, пробки. Вагоностроение и судостроение: детали воздушных тормозов, иллюминаторные кольца
КЧ 45-7	Автомобилестроение: ступицы колес, тормозные барабаны, крышки подшипников коленчатого вала. Тракторное и сельскохозяйственное машиностроение: шестерни, муфты, втулки, звенья цепей, ключи барашки. Вагоностроение и судостроение: кронштейны, скобы, иллюминаторные кольца. Электропромышленность: державки проводов, шапки, крючья изоляторов, клеммы и др.
КЧ 50-5	Автомобилестроение: крышки подшипников коленчатого вала, картеры распределительной коробки. Станкостроение, текстильная промышленность: втулки, вилки, шестерни
КЧ 55-4	Автомобилестроение: ступицы колес, тормозные барабаны, картеры, редукторы и другие детали трансмиссии и дифференциала
КЧ 60-3	Автомобилестроение: шатуны, поршни, шестерни, детали автоматической коробки передач легкового автомобиля (корпусы сцепления и планетарного механизма, каретка спутников)

1	2
КЧ 65-3	Автомобилестроение: детали форсированных двигателей (шатуны, поршни, шестерни, корпусные отливки)
КЧ 70-2	Автомобильное и тракторное машиностроение: ответственные детали форсированных дизелей и двигателей внутреннего сгорания типа шатунов, поршней, шестерней, коленчатых валов
КЧ 80-1,5	Детали, работающие под высокими статическими и динамическими нагрузками и подвергаемые износу (коленчатые и распределительные валы, корпуса, кронштейны)



Рис. 11. Фотографии различных изделий из КЧ:

а – фасонное крепление, опоры подшипников и валов; *б* – сложное корпусное изделие; *в* – элемент запорной арматуры

Фотографии некоторых видов изделий из КЧ представлены на рис. 11.

4. Чугун с шаровидным графитом

Чугун с шаровидным графитом (ЧШГ) является первой разновидностью высокопрочного чугуна (ВЧ), вторая – чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) является перспективным конструкционным материалом для изготовления ответственных деталей.

Комплекс физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств выгодно отличает его от других конструкционных материалов: от стали – лучшей износостойкостью и антифрикционностью, более высокой коррозионной стойкостью и лучшей обрабатываемостью резанием; от серого чугуна – большей прочностью и пластичностью. Типичная структура ЧШГ представлена на рис. 12.

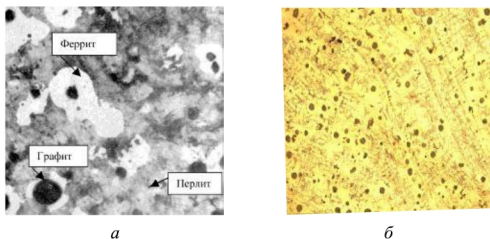


Рис. 12. Микроструктура ЧШГ (x100):

а – ферритно-перлитная матрица («бычий глаз»); б – аустенитная матрица (чугун «нирезист»)

Благодаря *относительно высокой жидкотекучести* ЧШГ может быть использован для производства сложных по конфигурации деталей, получение которых ковкой и штамповкой затруднено, а иногда просто невозможно. Меньшая плотность (на 8-10%) позволяет снизить массу деталей по сравнению с массой деталей из стали. Замена серого чугуна на чугун с

шаровидным графитом позволяет уменьшить в 1,5-2,0 раза толщину отливок и соответственно снизить массу деталей и машин. Детали из высокопрочного ЧШГ можно подвергать всем видам упрочняющей термической обработки, применяющейся для стали, иногда и с большим эффектом для изменения комплекса свойств отливок.

Особенностью ЧШГ является *высокое отношение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ к временному сопротивлению при растяжении σ_B* составляющее 0,6-0,7 (для углеродистых сталей общего назначения – 0,5-0,6), что важно для уменьшения расхода материалов и снижения массы машин, так как конструкции рассчитывают на прочность, как правило, по условному пределу текучести.

Циклическая вязкость или демпфирующая способность материала гасить возникающие при работе механизмов вибрации у ЧШГ хотя и ниже, чем у серого чугуна, но значительно выше, чем у стали. Эта характеристика у перлитно-ферритного ЧШГ при напряжении 50-100 МПа составляет 4-6%, в то время как у углеродистой стали – 0,3-0,6%.

Регламентация требований национальных стандартов на ВЧ практически одинаковая. Международный стандарт ИСО 1083 регламентирует классификацию литейных чугунов с шаровидным графитом в соответствии с механическими свойствами материала.

Основные марки, механические свойства и химический состав чугуна с шаровидным графитом по ГОСТ 7293-85, ИСО 1083 и национальным стандартам некоторых стран приведены в табл. 15-17 [1, 6].

Марки чугуна с шаровидным графитом. Для изготовления отливок по ГОСТ 7293-85 предусматриваются 8 марок чугуна с шаровидным графитом: ВЧ35; ВЧ40; ВЧ45; ВЧ50; ВЧ60; ВЧ70; ВЧ80; ВЧ100. Марка чугуна определяется показателями временного сопротивления разрыву σ_B и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$. Условное обозначение марки включает

буквы ВЧ (высокопрочный чугун) и числовое минимальное значение σ_B , МПа·10⁻¹.

Пример условного обозначения: ВЧ 50 ГОСТ 7293-85.

Таблица 15

Отечественные марки чугуна с шаровидным графитом и его зарубежные аналоги

Стандарт	Марки чугуна							
ГОСТ 7293-85, Россия	ВЧ 35	ВЧ 40	ВЧ 45	ВЧ 50	ВЧ60	ВЧ 70	ВЧ 80	ВЧ 100
ИСО 1083, Россия	350-22, 350-22AL	400-18, 400-18L, 400-18AL, 400-15, 400-15A	450-10	500-7, 500-7A	600-3, 600-3A	700-2, 700-2A	800-2	900-2
BS 2789, Великобритания	350/22L40, 350/22	400/18, 400/18L20	450/10	500/7	600/3	700/2	800/2	900/2
DIN 1693, Германия	GGG-35,3	GGG-40, GGG-40,3	-	GGG-50	GGG-60	GGG-70	GGG-80	-
ASTM A 536, США	-	60-40-18*	65-45-12	70-50-05	80-55-06	100-70-03	120-90-02	-
NF A 32-201, Франция	FGS 350-22L40, FGS 350-22	FGS 400-15, FGS 400-18, FGS 400-18L20	FGS 450-10	FGS 500-7	FGS 600-3	FGS 700-2	FGS 800-2	FGS 900-2
JIS G-5502, Япония	FCD 370	FCD 400	FCD 450	FCD 500	FCD 600	FCD 700	FCD 800	FCD 1000A**
* стандарты ASTM A 536 и A 395								
** стандарт JIS G-5503								

Механические свойства ЧШГ обеспечиваются в литом состоянии или после термической обработки. Показатели относительного удлинения, твердости и ударной вязкости определяются только при наличии требований в нормативно-технической документации, и они должны соответствовать требованиям ГОСТ 7293-85.

В стандарте ASTM A 536 (США) в маркировке чугуна первое и второе числа также определяют показатель предела прочности при разрыве σ_B : первое – умноженное на 10³ фунт/дюйм²; второе – округленное значение

этого показателя $\text{МПа} \cdot 10^{-1}$; третье – минимальное значение относительного удлинения, %.

Таблица 16

Механические свойства некоторых марок чугуна с шаровидным графитом

Стандарт	Марка чугуна	Толщина, мм	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	σ_5 , МПа	δ , %	НВ
ГОСТ 7293-85	ВЧ 35	Любая	350	220	22	140-170
ИСО 1083	350-22	25	350	220	22	Не более 150
	350-22A1	0-60	330	220	18	
		60-200	320	210	15	
BS 2789	350/22L40, 350/22	12-75	350	220	22	160
DIN 1693	GGG-35,3	10-75	350	220	22	-
NF A 32-201	FGS 350-22L40, FGS 350-22	12,5-75	350	220	22	150
JIS G 5502	FCD 370	12-75	370	230	17	179
ГОСТ 7293-85	ВЧ 40	Любая	400	250	15	140-202
ИСО 1083	400-18, 400-18L	25	400	250	18	-
	400-18AL	30-60	390	250	15	130-180
		60-200	370	240	12	
	400-15	30	400	250	15	-
	400-15A	30-60	390	250	15	-
		60-200	370	240	12	
BS 2789	400/18, 400/18L20	12-75	400	250	18	179
DIN 1693	GGG-40 GGG-40,3	10-70	400	250	15	120-165
		10-25	400	250	18	
		40	390	250	15	
		70	370	240	12	
ASTM A 536	60-40-18	13-75	414	276	18	149-187
NF A 32-201	FGS 400-15	12,5-75	400	250	15	130-180
NF A 32-201	FGS 400-18, FGS 400-18L20	12,5-75	400	250	18	130-180
JIS G 5502	FCD 400	12-75	400	250	12	201

Таблица 17

Химический состав чугуна с шаровидным графитом согласно ГОСТ 7293-85

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %					
	C			Si		
	Толщине стенки отливки, мм					
	до 50	50-100	св. 100	до 50	50-100	св. 100
ВЧ 35	3,2-3,8	3,0-3,5	2,7-3,2	1,9-2,9	1,3-1,7	0,8-1,5
ВЧ 40	3,3-3,8	3,0-3,5	2,7-3,2	1,9-2,9	1,2-1,7	0,5-1,5
ВЧ 45	3,3-3,8	3,0-3,5	2,7-3,2	1,9-2,9	1,3-1,7	0,5-1,5
ВЧ 50	3,2-3,7	3,0-3,3	2,7-3,2	1,9-2,9	2,2-2,6	0,8-1,5
ВЧ 60	3,2-3,6	3,0-3,3	-	2,4-2,6	2,4-2,8	-
ВЧ 70	3,2-3,6	3,0-3,3	-	2,6-2,9	2,6-2,9	-
ВЧ 80	3,2-3,6	-	-	2,6-2,9	-	-
ВЧ 100	3,2-3,6	-	-	3,0-3,8	-	-

В стандарте DIN 1693 (Германия) в марке GGG-50 буквы означают: G – *gegosen* (отлито); G – *GuPeisen* (чугун); G – *globular* (шаровидный); 50 – минимальное значение σ_B , МПа·10⁻¹.

В стандарте BS 2789 (Великобритания) буквенные обозначения не применяются.

В стандарте NFA 32-201 (Франция) буквы FGS означают: *fonte* (литье), *graphite* (графит) и *sferoidal* (шаровидный).

Стандарт JIS G 5502 (Япония) включает семь марок чугуна с шаровидным графитом: FCD 370 и FCD 400 – ферритные; FCD 450 и FCD 500 – ферритно-перлитные; FCD 600, FCD 700 и FCD 800 – перлитные чугуны.

Стандарт JIS G 5503 содержит три марки чугуна с шаровидным графитом: FCO 900 – ферритно-бейнитного класса с повышенной ударной вязкостью; FCD 1000 – со структурой матрицы «отпущенный мартенсит» – повышенной прочности; FCD 1200 – чугун мартенситного класса с повышенной твердостью, применяемый для отливок, работающих на износ. Последние три марки получают только термической обработкой с нагревом до области аустенитного превращения.

В международном стандарте ИСО 1083 буквенные обозначения не применяют. Стандарт содержит механические свойства, измеренные на образцах для испытаний, полученных из отдельно отлитых проб и отлитых вместе с отливкой.

В большинстве национальных стандартов на высокопрочные чугуны, регламентирующих механические свойства, химический состав чугунов не оговаривается. В стандартах всех стран, кроме России, Германии и США, приводятся контрольные пределы величин твердости.

Остальные параметры чугунов, в том числе микроструктура, могут контролироваться по требованию заказчика. Количество графита преимущественно шаровидной формы, оговариваемое в большинстве национальных стандартов, колеблется в широких пределах: от 70% (Япония) до 90% (США, ASTM A 395). В стандарте ASTM A 395 приведена единственная марка ферритного чугуна с контролем химического состава по основным элементам и твердости.

Необходимо отметить, что оценка формы графита в большинстве национальных стандартов, в том числе и ИСО 945, производится по эталонам, которые не дают количественных значений. Только в стандарте Японии JIS G 5502 приведена методика расчета степени сфероидизации (%) графита по формуле:

$$ССГ = \frac{0n_1 + 0,3n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1,0n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} 100 \quad (2)$$

где: n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 – количество графитовых включений, соответствующих различным формам графита от пластинчатой до шаровидной, всего пять форм (рис. 13), определяемых на шлифе или фотографии и сравниваемых по фигурам, приведенным в стандарте.



Рис. 13. Характеристика форм (n_1 - n_5) графита

Фотографии некоторых видов изделий из ВЧШГ представлены на рис. 14.

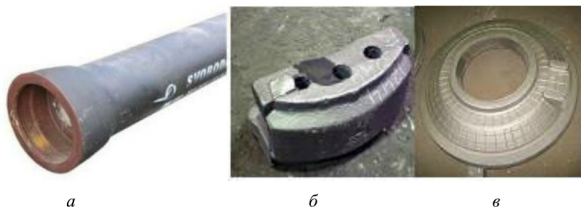


Рис. 14. Фотографии различных изделий из ВЧШГ: *а* – труба производства ОАО «ЛМЗ «Свободный сокол»; *б* – тормозная колодка БЕЛАЗа; *в* – элемент коробки передач

Методы испытаний стандартных образцов и образцов, вырезанных из тела отливок из ВЧШГ:

1. Определение механических свойств проводят по ГОСТ 1497 на одном образце диаметром 14 мм с расчетной длиной 70 мм. Допускается в нормативно-технической документации на конкретную продукцию устанавливать образцы других размеров.

2. Испытания на ударную вязкость KCV проводят на трех образцах шириной 10 мм по ГОСТ 9454-78.

3. Определение твердости проводят по ГОСТ 24805-85.

4. При получении неудовлетворительных результатов испытаний по требуемым показателям проводят повторные испытания на двух образцах.

Результаты испытаний считают удовлетворительными, если они соответствуют требованиям настоящего стандарта.

5. При получении неудовлетворительных результатов испытаний образцов в литом состоянии допускается их термообработка вместе с отливками с последующей проверкой механических свойств в соответствии с изложенным.

6. Для определения механических свойств чугуна применяют отдельно отлитые заготовки, форма и размеры которых приведены в ГОСТ 7293-85.

7. Условия заливки заготовок для образцов должны соответствовать условиям заливки самих отливок.

8. При применении термообработки для получения заданной марки чугуна вместе с партией отливок должна проводиться термообработка отдельно отлитых заготовок, из которых вырезаются образцы для определения механических свойств.

9. Форма графита в структуре чугуна определяется по ГОСТ 3443-87.

5. Чугун с вермикулярным графитом

Чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ или высокопрочный чугун с вермикулярным графитом – ВЧВГ) занимает промежуточное значение между чугунами с пластинчатым и шаровидным графитом. Он обладает высокой прочностью, повышенной теплопроводностью, малой чувствительностью механических свойств к толщине стенки отливки и скорости охлаждения. Все это делает ЧВГ перспективным материалом для использования взамен серого чугуна при изготовлении ответственных и крупногабаритных отливок, работающих в условиях динамических и термодинамических нагрузок. Типичная структура ЧВГ представлена на рис. 15.

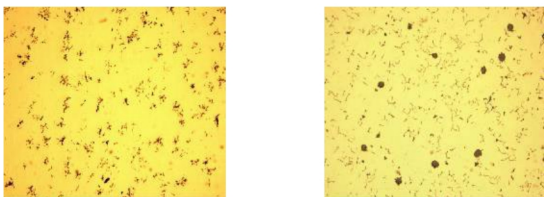


Рис. 15. Микроструктура чугуна (x100) со 100% вермикулярным графитом (слева) и вермикулярный графит и шаровидный графит (справа)

Чугун с вермикулярным графитом обладает хорошей жидкотекучестью, малой линейной усадкой (около 1%), поэтому при замене СЧ на ЧВГ не требуются существенные изменения литейной оснастки и технологии [1-4].

Основные марки. ГОСТ 28394-89 устанавливает марки чугуна для отливок, имеющего в структуре графит вермикулярной формы (ВГ) с количеством шаровидного графита не более 40%, определяемые на основе механических свойств. Для изготовления отливок должны применяться чугуны следующих марок: ЧВГ 30, ЧВГ 35, ЧВГ 40, ЧВГ 45. Марка чугуна

определяется временным сопротивлением разрыву при растяжении и условным пределом текучести. Условное обозначение марки включает: букву Ч – чугун; буквы ВГ – форма графита (вермикулярный графит) и цифровое обозначение минимального значения временного сопротивления разрыву при растяжении в МПа·10⁻¹.

Пример условного обозначения чугуна с вермикулярным графитом с временным сопротивлением при растяжении 300 МПа·10⁻¹:

ЧВГ30 по ГОСТ 28394-89

Свойства. Механические свойства чугуна в литом состоянии или после термической обработки должны соответствовать нормам, указанным в табл. 18.

Таблица 18

Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом

Марка чугуна	σ_B , МПа (кгс/мм ²)	$\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	δ ,%	НВ
	не менее			
ЧВГ 30	300 (30)	240 (24)	3,0	130-180
ЧВГ 35	350(35)	260 (26)	2,0	140-190
ЧВГ 40	400 (40)	320 (32)	1,5	170-220
ЧВГ 45	450 (45)	380 (38)	0,8	190-250
Примечание. Относительное удлинение и твердость по Бринеллю определяют при наличии специальных требований в нормативно-технической) документации. По требованию потребителя допускается устанавливать другие значения твердости.				

В Румынии стандартизированы три марки ЧВГ: Fgv 300; Fgv 350; Fgv 400. Цифры означают минимальное значение показателя предела прочности при растяжении, МПа.

Фирма Великобритании «*International Mechanite Metal*» применяет отраслевой стандарт, оговаривающий только две марки чугуна с

вермикулярным графитом: FC 275 – ферритный чугун и FC 400 – перлитный чугун.

В США стандартом предусматривается три марки чугуна, обозначаемые цифрами: I, II, III.

С точки зрения влияния химического состава на механические и прочие свойства ЧВГ следует отметить, что форма графита, образующаяся в процессе кристаллизации расплава в форме, определяется в большей степени типом и эффективностью модифицирования, чем содержанием основных легирующих элементов. Для сложнопрофильных отливок выбирают марки ВЧВГ когда либо литейная технология не позволяет использовать ВЧШГ (из-за относительно пониженной текучести и повышенной усадки), либо просто не отработана эффективная технология модифицирования на 100% шаровидный графит (см. рис. 15 и стр. 42-43). В результате получается отливка с переменной структурой, которая и идентифицируется в нормативной документации как отливка из ВЧ по ГОСТ 28394-89 (хотя в стандарте ранжируется состав по углеродному эквиваленту). Иными словами, на практике химический состав ЧВГ может быть точно таким, как и у ЧШГ, различается лишь технология модифицирования. Типичный пример ответственной отливки с переменной структурой представлен на рис. 16.

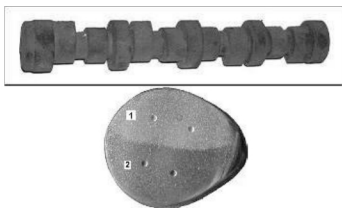


Рис. 16. Общий вид отливки типа «Распределительный вал» и макроструктура поперечного темплета (x2): 1 – зона с шаровидным графитом; 2 – зона с вермикулярным графитом (круглые «вмятины» – места замера твердости)

Область применения отливок из основных марок ЧВГ представлена в табл. 19.

Таблица 19

Области применения чугуна с вермикулярным графитом

Марка чугуна	Область применения
ЧВГ 30	Детали общего машиностроения (взамен серого чугуна), работающие при повышенных циклических механических нагрузках.
ЧВГ 35, ЧВГ 40	Детали двигателей внутреннего сгорания, работающие при переменных повышенных температурах и механических нагрузках: автомобилестроение и тракторостроение, судостроение, дизелестроение, транспортное машиностроение, энергетическое машиностроение, металлургическое машиностроение
ЧВГ 45	Детали, работающие при значительных механических нагрузках, в условиях трения, износа, гидрокавитации и при повышенных термоциклических нагрузках

Методы испытаний ЧВГ аналогичны методам испытания ЧШГ, исключая п. 2 и п. 3 (см. стр. 42). Испытания на ударную вязкость (п. 2) в стандарте не оговариваются, а определение твердости (п. 3) проводят по ГОСТ 27208-87.

6. Чугуны специального назначения

Для полноты представлений о составе и области применения конструкционных чугунов, следует пару слов сказать о так называемых *чугунах специального назначения* или *легированных чугунах со специальными свойствами*. К этой группе чугунов относятся жаростойкие (ГОСТ 7769-82), жаропрочные и коррозионностойкие (ГОСТ 11849-76) чугуны. Сюда же можно отнести немагнитные, износостойкие и антифрикционные чугуны.

Жаростойкими являются серые и высокопрочные чугуны, легированные кремнием (ЧС5) и хромом (4Х28, 4Х32). Эти чугуны обладают жаростойкостью до 700-800°C на воздухе, в топочных и генераторных газах. Высокой термостойкостью и жаростойкостью обладают аустенитные чугуны: высоколегированный никелевый серый ЧН15Д7 и с шаровидным графитом ЧН15Д3Ш.

К *жаропрочным чугунам* относятся аустенитные чугуны с шаровидным графитом ЧН19Х3Ш и ЧН11Г7Ш, ЧН15Д7 («нирезист»). Для повышения жаропрочности чугуны подвергают отжигу с последующим отпуском. После отжига легированные карбиды приобретают форму мелких округлых включений.

В качестве *коррозионностойких* применяют чугуны, легированные кремнием (*ферросилиды*) – ЧС13, ЧС15, ЧС17 и хромом - 4Х22, 4Х28, 4Х32. Они обладают высокой коррозионной стойкостью в серной, азотной и ряде органических кислот. Для повышения коррозионной стойкости кремнистых чугунов их легируют молибденом (4С15М4, 4С17М3 – антихлоры). Введение в чугун 0,2-0,5% *Мо* уменьшает склонность к росту зерна, повышает вязкость, сопротивление износу и улучшает свойства при повышенных температурах. Высокой коррозионной стойкостью в щелочах обладают никелевые чугуны, например, аустенитный чугун ЧН15Д7 (он же – немагнитный и жаропрочный).

В качестве немагнитных чугунов также применяются аустенитные чугуны. Их используют в тех случаях, когда требуется минимальная потеря мощности (крышки масляных выключателей, концевые коробки трансформаторов и др.) или когда нужно избегать искажений магнитного поля (стойки для магнитов).

К износостойким чугунам относятся половинчатые и отбеленные чугуны. К износостойким половинчатым чугунам относится, например, серый чугун марки ИЧНХ2, легированный никелем и хромом, а также чугуны ИЧХНТ, ИЧН1МШ (с шаровидным графитом). Из этих чугунов отливают детали двигателей внутреннего сгорания (крышки и днища цилиндров, головки поршней и др.). Типичная структура доэвтектического, эвтектического и заэвтектического химического состава (C_s более 4,3%) белого чугуна представлена на рисунке 17.

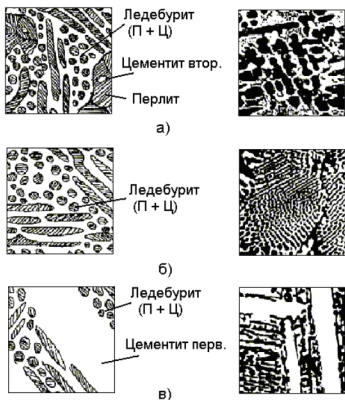


Рис. 17. Схема (слева) и фотография (справа) микроструктуры белого чугуна (x100)

Антифрикционными чугунами являются серые и высокопрочные чугуны специальных марок. Некоторое применение нашли также ковкие антифрикционные ферритно-перлитные чугуны – АЧК-1 и АЧК-2. Антифрикционные серые чугуны – перлитные чугуны АЧС-1 и АЧС-2 и перлитно-ферритный чугун АЧС-3. Эти чугуны обладают низким коэффициентом трения, зависящим от соотношения феррита и перлита в основе, а также от количества и формы графита. В перлитных чугунах высокая износостойкость обеспечивается металлической основой, состоящей из тонкого перлита и равномерно распределенной фосфорной эвтектики при наличии изолированных выделений пластинчатого графита. Антифрикционные серые чугуны применяют для изготовления подшипников скольжения, втулок и других деталей, работающих при трении о металл, чаще в присутствии смазочного материала. Детали, работающие в паре с закаленными или нормализованными стальными валами, изготавливают из чугунов АЧС-1 и АЧС-2, а для работы в паре с термически необработанными валами применяют чугун АЧС-3.

Антифрикционные высокопрочные (с шаровидным графитом) чугуны (ГОСТ 1585-85) изготавливают с перлитной структурой – АЧВ-1 и ферритно-перлитной (менее 50% перлита) – АЧВ-2. Например, марка АЧВ-1 используется для работы в узлах трения с повышенными окружными скоростями в паре с закаленным или нормализованным валом. АЧВ-2 применяют для пары с валом в состоянии поставки («сырым»). Главное достоинство антифрикционных чугунов по сравнению с баббитами и антифрикционными бронзами – *низкая себестоимость* (в 2,5 - 3,0 раза), а основной недостаток – *плохая прирабатываемость*, что требует точного сопряжения трущихся поверхностей.

7. Общее влияние химического состава на структуру и свойства чугунов

На структуру и свойства чугунных отливок оказывает влияние ряд факторов: химический состав, скорость кристаллизации и охлаждения в форме, модифицирование и термическая обработка. Влияние основных химических элементов на структуру и свойства различных по микроструктуре чугунов, согласно литературным данным [1-25], приведено в табл. 20.

Таблица 20

Влияние химических элементов на свойства чугуна

Серый чугун	Высокопрочный чугун	Ковкий чугун
1	2	3
Углерод		
Повышенное содержание углерода приводит к уменьшению прочности, твердости, и к увеличению пластичности, углерод улучшает литейные свойства чугуна	Увеличенное содержание углерода улучшает литейные свойства чугуна	Углерод – основной регулятор механических свойств ковкого чугуна, чугун обладает низкой жидкотекучестью и требует высокого перегрева
Кремний		
Кремний с учетом содержания углерода способствует выделению графита и снижает твердость, а также уменьшает усадку; повышенное содержание кремния снижает пластичность и несколько увеличивает твердость	С повышением содержания кремния возрастает предел прочности при растяжении, при дальнейшем увеличении содержания уменьшаются предел прочности при растяжении и относительное удлинение	Для ферритного ковкого чугуна суммарное содержание кремния и углерода должно быть равно 3,7-4,1%. Содержание кремния зависит от количества углерода и толщины стенки. При содержании кремния до 1,5% механические свойства сплава повышаются
Марганец		
Марганец тормозит выделение графита, способствует измельчению перлита и отбеливанию чугуна; взаимодействуя с серой, нейтрализует ее вредное действие. Механические свойства чугуна повышаются при содержании марганца до 0,7-1,3%, а при дальнейшем увеличении снижаются. Марганец увеличивает усадку сплава	С повышением содержания марганца уменьшается доля феррита и увеличивается количество перлита; при этом повышается предел прочности при растяжении и уменьшается относительное удлинение. Для повышения износостойкости содержание марганца увеличивают до 1,0-1,3%	Марганец увеличивает количество связанного углерода, повышает прочность феррита. При повышении содержания марганца до 0,8-1,4% увеличивается количество перлита, прочность сплава повышается, но резко падают пластичность и ударная вязкость. В ферритном чугуне содержание марганца не должно превышать 0,6%, в перлитном - 1,0%

1	2	3
Магний и церий		
Однозначно не определено	Для образования графита шаровидной формы содержание магния должно быть не ниже 0,03%, а церия – не ниже 0,02% (остаточное содержание). При более низком содержании часть графита имеет форму пластинок, что снижает механические свойства сплава. При повышенном содержании магния (и церия) в структуре сплава образуется цементит и, следовательно, снижаются механические свойства. Оптимальное содержание остаточного магния – 0,04-0,08%	Однозначно не определено
Сера		
Сера снижает прочность и пластичность, но несколько повышает износостойкость сплава; считается вредной примесью; придает чугуны краснотекучесть (образование трещин при высоких температурах), препятствует выделению графита	Чем выше содержание серы в исходном чугуне, тем труднее получить полностью шаровидную форму графита и, следовательно, высокие механические свойства	Содержание серы в ферритном ковком чугуне, модифицированном алюминием, может быть повышено до 0,2%; при этом механические свойства возрастают за счет улучшения формы графита. Определяющее влияние на механические свойства чугуна оказывает отношение содержания марганца и серы в пределах 0,8-3,0%
Фосфор		
Фосфор на процесс графитизации углерода влияет слабо, но повышает жидкотекучесть сплава; придает чугуны хладноломкость (хрупкость)	Фосфор оказывает существенное влияние на структуру и механические свойства. Чтобы получить чугун с высокой пластичностью, содержание фосфора не должно превышать 0,08%. Для получения чугуна с невысокой пластичностью содержание фосфора увеличивают до 0,12-0,15%	Влияние фосфора на структуру и механические свойства ковкого чугуна такое же, как и на серый

Никель		
1	2	3
Никель – легирующий элемент, благоприятно влияющий на выравнивание механических свойств в отливках с различной толщиной стенок; повышает твердость на 10 НВ. С увеличением содержания никеля возрастает коррозионная стойкость и улучшается обрабатываемость сплава	Никель – влияет на тепло- и электропроводимость, а также на электросопротивление, коррозионную стойкость и жаростойкость сплава. С увеличением содержания никеля эти свойства повышаются	Никель способствует графитизации углерода и увеличивает количество перлита в металлической основе сплава
Хром		
Хром – карбидообразующий элемент. С увеличением содержания хрома повышаются прочность и твердость отливок, замедляется процесс графитизации углерода	С увеличением содержания хрома в определенных пределах повышается жаростойкость, коррозионная стойкость и износостойкость	Хром замедляет процесс графитизации углерода. Содержание хрома в сплаве не превышает 0,06-0,08%; повышение содержания до 0,1-0,12% приводит к образованию в структуре сплава стойких карбидов
Молибден		
Молибден – легирующий элемент, замедляющий процесс графитизации углерода и способствующий карбидообразованию. С увеличением содержания молибдена повышается твердость без ухудшения обрабатываемости и возрастает сопротивление износу	Однозначно не определено	Молибден способствует измельчению перлита и графитовых включений, увеличивает предел прочности на 30-70 кПа при содержании молибдена до 0,5%; замедляет процесс графитизации углерода
Медь		
Медь способствует графитизации углерода, увеличивает жидкотекучесть, повышает прочность и твердость сплава	При содержании в сплаве 1% меди предел прочности при растяжении повышается до 40%, а текучесть до 50%, соответственно при 2% меди – до 65 и 70%. Содержание меди более 2% препятствует образованию в структуре сплава шаровидного графита	Медь способствует графитизации углерода и увеличивает содержание в сплаве перлита

Таким образом, практически каждый легирующий элемент по-разному оказывает влияние на свойства чугуна с различным типом микроструктуры. Поэтому в производственной практике всегда проводится комплекс исследовательских работ и технологических мероприятий при запуске в производство нового химического состава чугуна. Они всегда

осуществляются на *определенном типе номенклатуры отливок*, при использовании всей имеющейся у предприятия «исследовательской мощности», и, в первую очередь, с привлечением к работе оборудования и персонала химической и металлографической лабораторий.

8. Общие технологические свойства литейных конструкционных чугунов

Жидкотекучесть. Под жидкотекучестью чугуна и стали понимают способность металла заполнять форму и точно воспроизводить ее конфигурацию. Жидкотекучесть расплава зависит от ряда факторов, характеризующих металл, форму и условия ее заливки и имеет решающее влияние на заполнение литейной формы при получении тонкостенных отливок без спаев, незаливов и других дефектов.

Величина жидкотекучести зависит от физико-химических свойств сплава, свойств литейной формы и условий заливки. Основное влияние на жидкотекучесть оказывает теплосодержание чугуна. Чем больше теплосодержание, тем дольше металл находится в жидком состоянии. Влияние теплосодержания на жидкотекучесть определяется теплотой кристаллизации и температурой перегрева. Решающее влияние на жидкотекучесть оказывает температура перегрева.

Влияние температуры чугуна на жидкотекучесть имеет почти прямолинейную зависимость: чем выше температура чугуна, тем выше жидкотекучесть. При понижении температуры менее температуры ликвидус жидкотекучесть резко падает, что объясняется выделением твердой фазы из расплава.

Многочисленными исследованиями показано, что чугун эвтектического состава с пластинчатым графитом имеет максимальную жидкотекучесть. Зависимость величины жидкотекучести от углеродного эквивалента для чугунов с различным содержанием фосфора, представленная на рис. 18, показывает, что наличие значительного содержания фосфора позволяет достичь максимальной жидкотекучести в чугунах заэвтектического состава. Зависимость жидкотекучести чугуна от химического состава качественно одинакова при любой температуре заливки, однако влияние отдельных химических элементов на жидкотекучесть различно. С повышением

содержания углерода в чугунах доэвтектического состава увеличивается жидкотекучесть, что вероятно связано с понижением температуры ликвидуса, сокращением интервала кристаллизации и приближением чугуна к эвтектическому составу.

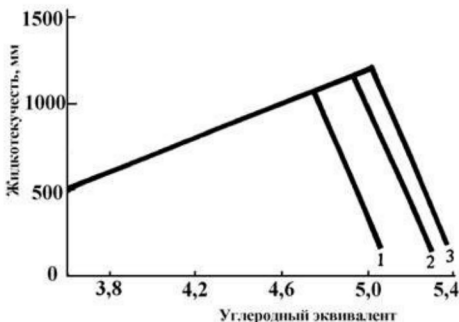


Рис. 18. Зависимость жидкотекучести от углеродного эквивалента для серого чугуна с содержанием фосфора 0,03% (1), 0,05% (2) и 1,0% (3)

Аналогичное влияние на жидкотекучесть оказывает кремний – с повышением содержания кремния понижается температура начала кристаллизации чугуна, что приводит к повышению жидкотекучести.

Влияние серы и марганца на жидкотекучесть незначительно. При наличии в чугунах значительного количества серы марганец вступает с ней в соединение, образуя сульфид марганца. Вследствие его тугоплавкости сильно увеличивается внутреннее трение и уменьшается жидкотекучесть.

Влияние таких легирующих элементов, как никель, хром, медь в тех количествах, в которых они применяются в чугунах с пластинчатым графитом, на жидкотекучесть чугуна незначительно.

Жидкотекучесть, определяемая по результатам заливки технологических проб, имеет полуэмпирическую формулу для предварительного расчета (мм):

$$L_{\text{жид}} = 83(C + 0,25Si + 0,5P) + 0,425t_{\text{зал}} - 826,5 \quad (3)$$

На практике жидкотекучесть чугунов измеряют обычно по спирали Кэрри, которую отформовывают из того же материала, что и литейные формы и заливают жидким чугуном. Форма стандартной спирали Кэрри представлена на рисунке 19.

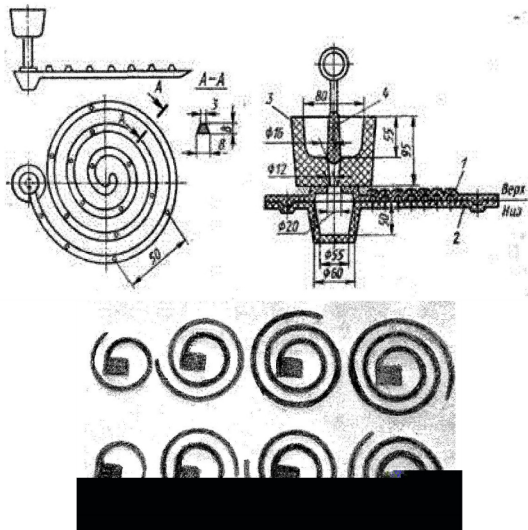


Рис. 19. Размеры стандартной спирали (сверху) и фотографии залитых спиралей чугуном с повышенной и пониженной (снизу) жидкотекучестью

В среднем можно принять, что длина спирали Кэрри сечением 50 мм возрастает на 4 см на каждые 10 С подъема температуры заливки.

Усадка. Уменьшение объема чугуна, залитого в форму, от момента ее заполнения до конца охлаждения сформировавшейся отливки принято называть усадкой.

Различают линейную усадку ($\epsilon_L = (l_\phi - l_0)/l_0 \cdot 100, \%$) и объемную усадку ($\epsilon_{об} = (V_\phi - V_0)/V_0 \cdot 100, \%$ – здесь l_ϕ и V_ϕ , соответственно, линейный размер и объем формы, l_0 и V_0 – размер и объем отливки).

Усадочные явления, протекающие при охлаждении чугуна, определяются как составом, от которого зависят температурный интервал кристаллизации и характер фазовых и структурных превращений, так и интенсивностью охлаждения. Для серого чугуна и чугуна с шаровидным графитом характерны следующие этапы линейной усадки: *предусадочное расширение, доперлитная усадка, расширение при перлитном превращении и послеперлитная усадка*. При охлаждении белого чугуна отсутствует предусадочное расширение и расширение при перлитном превращении.

При кристаллизации серого чугуна, сопровождающейся выделением сравнительно большого количества графита, плотность которого примерно в три раза меньше, чем плотность аустенита, коэффициент линейной усадки колеблется от 0,9% до 1,3%. По этой причине в отливках, как правило, не возникает горячих трещин, уменьшается пористость, не образуются сосредоточенные усадочные раковины и т.п.

В белом чугуне, где высокоуглеродистая фаза представлена более плотным цементитом, усадка больше и составляет 1,5-2,0%. По сравнению с серым чугуном склонность к образованию усадочных дефектов в белом чугуне заметно увеличивается.

Несмотря на то, что химический состав ВЧШГ близок к серому чугуну, процесс усадки при затвердевании чугуна с шаровидным графитом отличается от аналогичного процесса, протекающего в сером чугуне. Образование шаровидных включений графита вместо пластинчатых существенно влияет на характер протекания эвтектического превращения. Углерод на стадии одновременной кристаллизации графита и аустенита

поступает к *графитному* включению не из жидкой фазы, как это происходит в сером чугуна, а через аустенитную оболочку. Это основная причина значительного переохлаждения жидкой фазы, наблюдаемого при эвтектическом превращении в ЧШГ. При относительно глубоком переохлаждении жидкости начинается кристаллизация цементитной эвтектики с последующим ее распадом в результате *самоотжига* на графит и аустенит. Поэтому иногда в отливках из чугуна с шаровидным графитом появляются даже сосредоточенные усадочные раковины, что нехарактерно для отливок из серого чугуна с примерно одинаковым углеродным эквивалентом (рисунок 20).

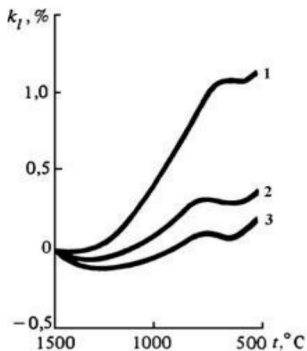


Рис. 20. Изменение коэффициента линейной усадки k_l при охлаждении белого чугуна (1), серого чугуна (2) и чугуна с шаровидным графитом (3)

Считается, что появление сосредоточенных усадочных раковин в отливках из ЧШГ — следствие *предусадочного* расширения, поскольку увеличение объема внутри корки не компенсируется притоком жидкого

металла. Предусадочное расширение не проявляется, естественно, при затвердевании расплава в неподатливых формах.

При отливке деталей со сложной конфигурацией литейная форма в подавляющем большинстве случаев состоит из стержней, имеет различные выступающие части, которые вместе со стержнями создают определенные затруднения протеканию усадки. Механическое торможение линейной усадки, обусловливаемое литейной формой, существенно влияет на величину предусадочного расширения и величину доперлитной усадки. При торможении усадки в отливке возникают внутренние напряжения, которые могут превысить прочность металла при данной температуре – образуются горячие трещины. Сравнительные данные по усадке серого, белого и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом приведены в табл. 21 [10,11].

Таблица 21

Объемная и линейная усадка различных видов чугунов, %

Тип чугуна	В жидком состоянии при кристаллизации	В твердом состоянии (до температуры эвтектоида)	Общая объемная усадка, %
Серый	4,2	2,7-3,9	6,9-5,1
ВЧШГ	8,0	1,5-3,6	0,04-0,94
Белый	5,75	10,3-11,1	0,0

Различают последовательное и объемное затвердевание чугуна. Последовательное затвердевание характерно для чугуна близкого по составу к эвтектическому, имеющему малый температурный интервал затвердевания. Объемное затвердевание характерно для чугуна доэвтектического состава, имеющего значительный интервал затвердевания. Для последовательного затвердевания свойственно образование выраженной усадочной раковины. При объемном затвердевании

жидкость оказывается замкнутой между кристаллами, что затрудняет питание отливки и, как следствие, *по всему объему отливки образуется усадочная пористость.*

Степень поражения отливок усадочными дефектами в немалой степени зависит от количества выделенного углерода в виде графита и от продолжительности его выделения. Процесс выделения графита при охлаждении чугуна, обработанного магнием, не оказывает существенного влияния на уменьшение объема усадочных раковин. Чугун с шаровидным графитом более склонен к образованию *сосредоточенных усадочных раковин и сосредоточенной усадочной пористости. Наибольший объем сосредоточенных усадочных раковин образуется в чугуне, близком к эвтектическому составу, имеющем очень узкий температурный интервал кристаллизации.* Объем усадочных раковин в отливках из чугуна с шаровидным графитом зависит в значительной степени от углеродного эквивалента. В заэвтектическом чугуне объем сосредоточенных усадочных раковин увеличивается по мере уменьшения углеродного эквивалента, достигая максимальной величины у чугуна, имеющего состав, близкий к эвтектическому. *Уменьшение углеродного эквивалента в доэвтектическом чугуне приводит к уменьшению объема сосредоточенных усадочных раковин.*

Ликвация – неоднородность химического состава сплава в различных частях отливки. Ликвация образуется в процессе затвердевания отливки, из-за различной растворимости отдельных компонентов сплава в твердой и жидкой фазах. В сталях и чугунах заметно ликвируют *сера, фосфор и углерод, в зависимости от содержания – кремний.*

Различают ликвацию *зональную*, когда различные части отливки имеют различный химический состав, и *дендритную*, когда химическая неоднородность *наблюдается в каждом зерне* определенной структурной зоны слитка или отливки.

Помимо ликвации химических элементов в чугуне наблюдается *ликвация по плотности* (для многотонных отливок).

Различают прямую и обратную ликвации. При прямой зональной ликвации химические элементы перемещаются от периферии к центру отливки. При обратной зональной ликвации химические элементы перемещаются от центра к периферии. При прямой внутрикристаллитной ликвации концентрация ликвирующего элемента возрастает в кристаллите от центра к периферии, а при обратной ликвации - от периферии к центру. В целом наибольшее влияние на свойства чугуна и качество отливок оказывает зональная ликвация элементов. Степень зональной ликвации элементов чугуна зависит от многих факторов, в том числе от состава, температуры чугуна и скорости охлаждения (см. рис. 21).

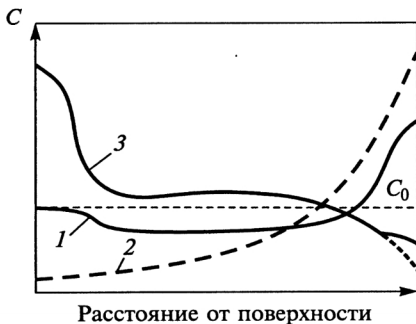


Рис. 21. Схема формирования прямой (1, 2) и обратной (3) зональной ликвации в условиях частичной конвекции (1) и интенсивного механического перемешивания (2) расплава в процессе кристаллизации

Ликвация углерода в чугуне может быть зональной и межкристаллитной, прямой и обратной, при этом чугун с шаровидным графитом имеет большую склонность к зональной и дендритной ликвации, чем чугун с пластинчатым графитом. В чугуне заэвтектического состава

углерод обладает наибольшей ликвирующей способностью. В чугунах, обработанных магнием, углерод ликвидирует в междендритные пространства, содержание его во внутренних зонах дендритов значительно меньше. В чугунах с низким содержанием углерода и кремния наблюдается прямая ликвация кремния, а при высоком содержании этих элементов наблюдается обратная ликвация кремния.

Например, концентрация кремния в дендритных ветвях достигает 2,2%, между ветвями дендритов – 1,35%, а на границах эвтектических колоний, затвердевающих последними – до 1% при среднем содержании кремния в чугунах 1,83%. Схема ликвационных зон отливок и слитков представлена на рисунке 22.



Рис. 22. Схема расположения ликвационных зон в литых заготовках:

1 – ликвационное пятно; 2 – осевая V-образная ликвация;

3 – внеосевая Λ-образная ликвация

Вследствие низкой температуры затвердевания и в результате усадочных процессов фосфидная эвтектика иногда выжимается на поверхности отливки. С увеличением скорости кристаллизации внутрикристаллитная ликвация фосфора уменьшается.

Ликвацию серы часто наблюдают в чугунах, обработанных магнием. Это связано с тем, что образовавшиеся в значительном количестве сульфиды магния всплывают на поверхность формирующейся отливки.

Последнее важное свойство чугунов – газопоглощение. *Газопоглощение* – способность литейных сплавов в расплавленном состоянии растворять водород, азот, кислород и другие газы. Степень растворимости газов зависит от состояния сплава: с повышением температуры твердого сплава увеличивается незначительно; возрастает при плавлении; резко повышается при перегреве расплава. При затвердевании и последующем охлаждении растворимость газов уменьшается, в результате их выделения в отливке могут образоваться газовые раковины и поры.

Растворимость газов зависит от химического состава сплава, температуры заливки, вязкости сплава и свойств литейной формы и отдельно будет рассмотрена далее.

9. Количество и форма присутствия газов в чугунах

Газами в чугунах принято называть содержащиеся в них элементы или химические соединения, которые в свободном состоянии при нормальных условиях (20°C и давлении 1 атм.) являются газообразными. В значительном числе случаев они или представляются твердыми неметаллическими фазами, или входят в состав металлических фаз, иногда образуют растворы и газовые раковины (поры, «пузыри», микропористость).

Содержание газообразных элементов в металлах обычно выражают в массовых долях (%), $\text{см}^3/100 \text{ г}$ или в миллионных долях (одна миллионная доля соответствует 0,0001%). Пересчет содержания газов с одной единицы измерения на другую может быть сделан на основе следующих зависимостей:

1) $1,0 \text{ см}^3/100 \text{ г } N = 0,00125\% = 12,5 \text{ миллионных долей};$

2) $1,0 \text{ см}^3/100 \text{ г } H = 0,00009\% = 0,9 \text{ миллионных долей};$

3) $1,0 \text{ см}^3/100 \text{ г } O = 0,00143\% = 14,3 \text{ миллионных долей}.$

На современном аналитическом оборудовании содержание H , N и O надежно определяется с точностью до 0,0001% (1 ppm).

Из простых газов в чугуне чаще всего встречаются N , H , O , из сложных – различные их соединения: CO , CO_2 , C_mH_n и т.д. [1]. В зависимости от формы состояния в чугуне газы могут быть причиной образования газовых раковин, газовой пористости и эндогенных твердых неметаллических включений. В зависимости от формы состояния, концентрации и состава влияние газов на комплекс свойств чугунов может быть положительным или отрицательным [1-10]. При образовании твердых растворов влияние газов на свойства металла связано с размерами их атомов. Радиусы атомов H , O , N соответственно равны 0,46; 0,68 и 0,71 Å. Наименьший радиус атома H обуславливает его чрезвычайно высокую диффузионную подвижность. Растворимость газов в жидком чугуне, как правило, выше, чем в твердом, и с повышением температуры увеличивается; но общее их содержание, с

учетом газов, связанных в виде соединений и не находящихся в растворе, при повышении температуры может уменьшаться.

Растворимость азота в металле изменяется скачкообразно в зависимости от модификации *Fe* и достигает максимума в жидком состоянии. С повышением температуры расплава растворимость *N* в нем плавно увеличивается и может быть определена по уравнению:

$$\lg [\% N] = - \left[\frac{1170}{t + 273} + 0,715 \right] \sqrt{P_{N_2}}, \quad (4)$$

где: $[\% N]$ – максимальная массовая доля растворенного *N*, %; $\sqrt{P_{N_2}}$ – парциальное давление *N* над жидким металлом (обычно, 0,79 атм.).

Растворимость *N* зависит также от химического состава металла. Элементы *Ti, V, Ni, Cr, Mn, Mo, W* увеличивают его растворимость в чугунах, а *Al, Cu, Zn, S, As, Ni, Si, P, O, C, Mg* – уменьшают. Равновесная растворимость *N* в жидком чугуне в зависимости от содержания основных элементов и температуры может быть рассчитана по формуле:

$$\begin{aligned} \lg [\% N] = & 1000/(t + 273) - 0,86 - 0,06 [\% Si + \% S] - \\ & - 0,15 [\% P] - 0,24 (\% C) + 0,015 [\% Mn] + 0,030 [\% Cr]. \end{aligned} \quad (5)$$

Однако в промышленных чугунах содержание *N* обычно не соответствует равновесному. В частности, в СЧ, выплавляемом в вагранках на холодном дутье, содержание *N* удовлетворительно описывается уравнением:

$$[\% N] = 0,089e^{-0,728C_3} \quad (6)$$

Чугун электродуговой плавки содержит азота больше, а индукционной – меньше. В зависимости от формы состояния *N* оказывает на структуру и свойства чугуна различное влияние. Так, при образовании фаз внедрения он увеличивает прочность σ_B и твердость *HB* и повышает стабильность карбидов; нитридные же его формы могут служить центрами графитизации, и их влияние на графитизацию прямо противоположно.

Современная техника анализа позволяет выявлять как общее содержание азота в чугунах, так и отдельно количество азота, содержащегося в стойких нитридах. Термическая обработка чугуна (например, отжиг ковкого чугуна) может привести к переходу одной формы N в другую. Степень графитизации СЧ с понижением в нем содержания N , входящего в твердый раствор, увеличивается. Нитридообразующие элементы оказывают разное влияние на графитизацию: например, Ti и B в количестве, соответствующем образованию нитридов, способствуют графитизации; при большей концентрации возможно образование карбидов с обратным эффектом. Несколько иначе влияет V : при содержании от 0,1 до 0,2% наблюдается значительное уменьшение содержания N в твердом растворе (до 0,001%) в результате образования VN . Повышение количества V сверх указанного выше приводит к увеличению содержания N в растворе, что связывают с усилением влияния V на повышение его растворимости в чугунах, которое превалирует над влиянием VN . В высокопрочном чугунах с шаровидным графитом (ВЧШГ), который модифицируется магнием, азот на форму графита непосредственного воздействия не оказывает. В этом случае его влияние может проявиться только в большей или меньшей *степени ферритизации* матрицы (повышения удельного количества феррита в структуре). Избыток содержания N в чугунах сверх равновесного значения при медленном охлаждении может привести к образованию в отливках характерной азотистой пористости. Вместе с тем в чугунах при быстром охлаждении может быть зафиксировано без нарушения сплошности матрицы содержание N , значительно (в 4-6 раз) превышающее равновесную концентрацию. В доэвтектическом СЧ азот влияет на равновесные температуры и, в частности, повышает температуру солидуса и уменьшает C_s , который характеризуется уравнением [20]:

$$C_s = [\% C] + 0,3 [\% Si] + 0,27 [\% P] - k [\% N], \quad (7)$$

где: k — коэффициент, который в зависимости от различных факторов может изменяться в заметных пределах; в частности, при $N = 0,015 \div 0,025\%$, $k \sim 4,7 \div 6,6$.

Так, например, нами установлена следующая линейная зависимость между температурой перегрева чугуна в индукционной печи (кислая футеровка) и общим содержанием азота:

1) при температурах 1500-1550⁰C — от 0,0047 до 0,0048%;

2) при температурах 1400-1450⁰C — от 0,0039 до 0,0042%.

В доменных литейных и перепельных чугунах в зависимости от условий выплавки содержание N колеблется в пределах от следов до 0,01% и более, что в определенной мере предопределяет различные «наследственные» свойства доменных чугунов. В сером и легированных чугунах N может быть использован в качестве элемента, оказывающего значительное влияние на улучшение их структуры и свойств. В ковком чугуне с повышением содержания N заметно увеличивается продолжительность первой и второй стадий графитизации (второй в большей степени, чем первой).

Растворимость водорода в жидком железе подчиняется закону *квадратного корня Сиверса*. При температурах от 1535 до 2450⁰C она изменяется в пределах от 0,0024 до 0,0036% или от 26,7 до 40,5 см³/100 г. Растворимость водорода в железе повышают Ti , Nb , Zr , Ce , La , Nd ; слабо влияют на растворимость водорода Mn , Cu , Co , Sn , Ni , Mo ; заметно понижают его растворимость C , Si , Al , B , O . В системе « $Fe-C$ » минимальная растворимость H соответствует составам, близким к эвтектическим. Как в чистом Fe , так и в « $Fe-C$ » — сплавах растворимость H с повышением температуры увеличивается. Для чистого Fe температурный коэффициент растворимости равен 3,3 см³/100 г на 100⁰C. В жидком состоянии СЧ может поглощать H в количествах 20-30 см³/100 г. В условиях, обеспечивающих экстракцию H из чугуна, он был обнаружен в экстрагированной фазе в виде H_2 , CH_4 , H_2O . В твердом чугуне H может находиться в форме протонов, молекул и в связанном состоянии.

В зависимости от состава и структуры чугуна, условий его выплавки и последующего хранения соотношение между различными формами H в чугуне может существенно изменяться. Многообразие форм состояния H и их непостоянство, зависящее от многих внешних условий, приводят к большим противоречиям в оценке его влияния на свойства чугуна, как в жидком, так и в твердом состояниях. В чугунных отливках H распределяется неравномерно, и его ликвация может проявляться чаще и резче, чем других элементов. Остаточное содержание малодиффузионных форм H в различных чугунах представляется следующими данными: в доменных до $30 \text{ см}^3/100\text{г}$ и более; в серых чугунах ваграночной плавки $0,7\text{-}30 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; в ковких чугунах после отжига от $0,6$ до $12 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Различные по составу, структуре и металлургическому происхождению чугуны характеризуются разной склонностью к поглощению и выделению H . Представление о форме состояния водорода в обыкновенном сером чугуне можно получить из данных табл. 22.

Таблица 22

Влияние эвтектичности на количество и форму состояния водорода в чугуне

Эвтектичность S_3	Количество водорода, $\text{см}^3/100 \text{ г}$		
	Диффузионно-подвижная форма	Форма, выделяющаяся только при вакуум-плавении	Общее количество
0,77	11,01	2,98	13,99
0,98	8,75	2,34	11,09
1,09	6,42	1,95	8,37

Наибольшее количество H в чугуне (около 79%) приходится на его диффузионно-подвижную форму. В зависимости от концентрации и формы состояния H может оказывать различное влияние на свойства чугуна в жидком или твердом состоянии: уменьшать скорость образования графитной

эвтектики; способствовать выделению грубых форм графита; увеличивать стабильность карбидов; способствовать увеличению дисперсности перлита; вызывать образование в отливках внутренних «белых» пятен, состоящих из карбидов; увеличивать склонность чугуна к отбеливанию; при наличии примесей Al , Ti , Mg и Mn вызывать образование пористости и понижать жидкотекучесть.

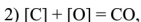
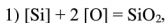
Кислород как в твердом, так и жидком чугуне может находиться в разных состояниях: в адсорбированном виде на различных поверхностях (отливки, раздела фаз и др.), в молекулярном или химически связанном состоянии; в виде шлаковых и других экзогенных включений; в виде простых или сложных оксидных включений эндогенного происхождения; в растворе. Две первые формы иногда называют «поверхностным кислородом», две последние – «внутренним».

Формы состояния O в чугуне предопределяются его химическим составом, металлургическим происхождением, условиями внепечной обработки, заливки и т.п. Так, например, модифицирование ферросилицием (ФС) и другими подобными модификаторами, как правило, приводит к увеличению содержания O в чугуне. В то же время введение в чугун Mg , Ca и десульфурация его кальцинированной содой или обработка газами, не содержащими O , всегда понижают его содержание. Во время медленной заливки, при турбулентном движении струи содержание O в чугуне может достигнуть 0,2%. В твердом чугуне содержание O не остается постоянным, так как O окружающей среды не только вызывает обычную коррозию отливок, но и диффундирует в их толщу. Кинетика этого процесса, в основном, предопределяется характером и количеством включений графита, выходящих на контактную с внешней средой поверхность отливки. Увеличение числа и дисперсности оксидных включений сопровождается развитием процесса графитизации и измельчением графита. Формы состояния O в чугуне могут быть в наиболее общем виде выявлены

сравнением содержания его в оксидах, определяемых при анализе неметаллических включений, с содержанием, которое выявляется при определении количества газов методом вакуумного восстановительного плавления.

Так, например, в оксидах массовая доля O составляет (%): в доменных чугунах – от 0,0016 до 0,0025, в ваграночных чугунах до модифицирования – 0,0060, после модифицирования – 0,0077; при выявлении методом вакуумного плавления содержание O в доменных чугунах - от 0,009 до 0,010, а в ваграночных чугунах до и после модифицирования, соответственно, 0,0016 и 0,0010.

Содержание и формы состояния O в жидком чугуне предопределяются, в основном, термодинамическими условиями протекания реакций:



Равновесное содержание O в жидком чугуне с повышением температуры увеличивается, причем на практике концентрация O заметно превышает равновесное, и поэтому при *высокотемпературных выдержках* в печи расплава концентрация может снижаться.

10. Сварка чугуна

В общем машиностроении применяются, главным образом, серые чугуны *наиболее распространенных марок* СЧ-00, СЧ-10 и СЧ-20 в виде отливок различных деталей механизмов и машин, арматуры и прочее. В связи с плохой свариваемостью сварку чугуна применяют только в двух случаях:

- 1) для исправления пороков различных отливок, идущих на изготовление новых механизмов и деталей машин;
- 2) при ремонте отдельных чугунных деталей заводского оборудования (например, станин, кронштейнов станков).

При сварке всех применяемых марок серых чугунов проявляется целый ряд их специфических свойств, значительно осложняющих процесс, а именно:

1. Чувствительность чугуна к большим скоростям нагрева и охлаждения, вызывающим образование трещин и отбеливание структуры. В результате в месте сварки образуется слой необрабатываемого хрупкого белого чугуна, имеющего физические и механические характеристики, отличающиеся от характеристик остальной матрицы серого чугуна. Различие в коэффициентах линейного и объемного расширения серого и белого чугунов приводит к тому, что при охлаждении в переходной зоне возникают высокие скалывающие напряжения, которые способствуют образованию трещин в этой зоне.

2. Низкие пластические свойства чугуна, характеризующиеся отсутствием площадки текучести на диаграмме растяжения, а также резким переходом чугуна из жидкого состояния в твердое и обратно. Хрупкость чугуна делает его чувствительным к перенапряжениям и тем самым усиливает его склонность к образованию всевозможного рода трещин.

3. Увеличение объема чугуна при охлаждении, обусловленное интенсивной графитизацией в интервале температур 1200-1100°C. Это

явление при сварке носит местный характер, что способствует образованию напряженного состояния в металле в зоне сварки.

4. При сварке происходит выгорание углерода с образованием окиси CO , которая способствует увеличению пористости металла шва.

Несмотря на трудности, на сегодняшний день сварка чугунных изделий в машиностроении и на ремпроизводствах применяется достаточно широко. Сварка чугуна может выполняться покрытыми или угольными электродами, порошковой проволокой, оборудованием для газовой сварки и другими способами. Существуют три основных *технологических направления сварки чугуна*:

- 1) сварка, обеспечивающая получение в металле шва чугуна;
- 2) сварка, обеспечивающая получение в металле шва низкоуглеродистой стали;
- 3) сварка, обеспечивающая получение в металле шва сплавов цветных металлов.

Важным способом борьбы с образованием отбеленных и закаленных участков, а также возникновением трещин является предварительный подогрев свариваемой детали (рис. 23).



Рис. 23. Схема местного подогрева деталей под сварку

В зависимости от температуры предварительного подогрева различают следующие виды сварки металла:

1) *горячая сварка* – с температурой предварительного подогрева 600-650°C;

2) *полугорячая сварка* – с температурой предварительного подогрева до 400-450°C;

3) *холодная сварка* – без предварительного подогрева.

Горячая и полугорячая сварка чугуна используются в случаях, когда требуется получение в металле шва чугуна со свойствами, близкими к свойствам основного металла детали. Предварительный подогрев изделия до температуры 600-650°C при горячей сварке чугуна создает условия для сравнительно равномерного нагрева и более медленного охлаждения металла после сварки, что обеспечивает графитизацию чугуна – выделение углерода в виде графита – и предотвращение его выделения в виде цементита.

При полугорячей сварке чугуна улучшение графитизации металла достигается за счет введения в зону сварки графитизирующих веществ (кремния, титана, алюминия) и предварительного подогрева изделия с меньшей температурой, чем при горячей сварке. В табл. 23 представлен типичный состав электродов для горячей и полугорячей сварки чугунов, согласно ГОСТ 30430-96.

Таблица 23

Состав чугунных стержней для горячей и полугорячей сварки чугуна

Химический элемент	Марка А для горячей сварки	Марка Б для горячей и полугорячей сварки
Углерод	3,0–3,5	3,0–3,5
Кремний	3,0–3,4	3,5–4,0
Марганец	0,5–0,8	0,5–0,8
Фосфор	0,2–0,4	0,3–0,5
Сера	до 0,08	до 0,08
Хром	до 0,05	до 0,05
Никель	до 0,3	до 0,3

Холодная сварка чугуна выполняется в случаях, когда чугун в металле шва не предусмотрен, и может применяться в ряде случаев, когда в металле шва требуется получить чугун, в том числе с использованием графитизирующих веществ, при незначительных или средних по размеру дефектах, несквозных дефектах или сквозных дефектах небольшой протяженности и глубины, что определяется требованиями нормативно-технологической документацией конкретного производства.

11. Художественное литье из чугуна в России

Чугун как материал для производства художественных отливок использовался человечеством начиная со средних веков (в X веке нашей эры в Китайской Народной Республике из чугуна было отлито уникальное изваяние льва весом 100 тонн, к сожалению, до наших дней не сохранилось). С XV века в Германии, а затем и в других странах Европы (в России - с конца XVII в.) художественное литьё из чугуна получило особенно широкое распространение (например, парковая скульптура, надгробия, решётки, ограды, садовая мебель и пр.). В XX веке более массивное, чем бронзовое, но более дешёвое чугунное литьё со свойственной ему выразительностью «тяжёлого» материала и глухих полутонов применяется практически повсеместно в различных сферах народного хозяйства страны (см. рис. 24).



Рис. 24. Литые и кованые изделия с элементами из чугуна

На территории России в середине XIX века в уральском поселке Касли на небольшом чугунолитейном заводе сформировалось замечательное искусство, прославившее мастеров на весь мир, – художественное литье из чугуна. Относительно простой материал – чугун под руками мастеров приобретал удивительные качества, позволившие создать изделия, по своему художественному совершенству не уступающие лучшим образцам ювелирного искусства (см. рис. 25).



Рис. 25. Художественные скульптуры, выполненные полностью из чугуна

Примером их великолепного мастерства может служить отлитый целиком браслет, состоящий из 100 звеньев, или цепочка для часов, весящая всего лишь 20 граммов. На Всемирной выставке в Париже в 1900 году многие посетители с восхищением рассматривали различные вещи – узорчатые канделябры, кружевные блюда, миниатюрную скульптуру и многие другие художественные предмета торговли каслинских мастеров, велико было их удивление, когда они узнали, что эти превосходные вещи необычного глубокого черного цвета изготовлены из чугуна. Успех каслинских предметов торговли был вполне закономерен, так как они отличались не только

высокими художественными качествами, но и мастерством обработки вещи в целом. Истоки мастерства каслинских умельцев лежат в богатейших традициях литейного дела, в освоении лучших образцов русской классической скульптуры. Превосходные произведения чугунного художественного литья получают признание, как на советских художественных выставках прикладного искусства, так и за рубежом. Современные приемы художественного литья из чугуна на Каслинском заводе в настоящее время практически ничем не отличаются от исторически сложившихся. Технология изготовления скульптуры из чугуна, несмотря на некоторые особенности, близка к технологии изготовления предметов торговли из других металлов: бронзы, латуни, алюминия. Над чугунной скульптурой в основном трудятся три разных специалиста – формовщик, чеканщик и специалист по окраске готовых художественных вещей. Формовка скульптуры требует от мастера больших знаний, мастерства и художественного вкуса. *Каслинцы используют главным образом литье в песчаные формы, реже прибегая к литью по восковым моделям* [12-15].

Чугунная скульптура, как бы она хорошо ни была отформована и отлита, выглядит еще незаконченной, ее поверхность требует доработки. Но стоит чеканщику, применив свой инструмент, отработать поверхность отливки, подчеркнуть её фактуру, а также удалить ненужные дефекты, как скульптура принимает вид художественного произведения.

Такие выдающиеся каслинские мастера-чеканщики, как М.О. Глухов, Н.А. Вихляев, Д.И. Широков и другие были не только великолепными исполнителями деталей, но и умело решали композицию в целом. Полную законченность скульптура приобретает только после окраски. Черный цвет органически связан с особенностями чугуна, с его пластическими и цветовыми свойствами. Каслинские мастера, владеющие секретом окраски отливок в черный цвет, всегда были в почете и ценились как специалисты высокого класса.

12. Вопросы для самоконтроля

1. Назовите определение чугуна.
2. Как по микроструктуре делятся чугуны?
3. Назовите области применения СЧ.
4. Назовите области применения ВЧШГ.
5. Назовите области применения КЧ.
6. Содержание каких элементов в чугуне определяет его важнейшие свойства?
7. Каким образом получают КЧ?
8. Назовите классификационный признак разделения чугунов на серые, белые и высокопрочные.
9. Какие типы металлической основы чугунов Вы знаете?
10. Чем отличается ВЧВГ от ВЧШГ?
11. С какой целью проводится модифицирование чугуна?
12. Назовите три основных технологических направления сварки чугуна.
13. Какие чугуны относятся к «белым»?
14. Какие чугуны относятся к «серым»?
15. Назовите общие технологические свойства литейных конструкционных чугунов.
16. От чего зависит жидкотекучесть?
17. От чего зависит склонность к усадке?
18. От чего зависит газонасыщенность?
19. От чего зависит склонность к ликвации?
20. Сколько и в какой форме содержится водород в чугунах?
21. Сколько и в какой форме содержится азот в чугунах?
22. Сколько и в какой форме содержится кислород в чугунах?
23. Перечислите основные группы марок чугунов специального назначения.
24. Какие специальные свойства чугунов Вы знаете?

25. В чем влияние углерода на структуру и свойства чугуна?
26. В чем влияние кремния на структуру и свойства чугуна?
27. В чем влияние марганца на структуру и свойства чугуна?
28. В чем влияние серы на структуру и свойства чугуна?
29. В чем влияние фосфора на структуру и свойства чугуна?
30. В каких единицах выражается газонасыщенность чугуна? Почему так?
31. От чего зависит тип металлической основы структуры СЧ?
32. От чего зависит тип металлической основы структуры ВЧШГ?
33. На какие механические свойства оказывает приоритетное влияние морфология графита?
34. На какие механические свойства оказывает приоритетное влияние тип металлической основы?

Библиографический список

1. Гиршович, Н.Г. Справочник по чугуному литью: справочник/ Н.Г. Гиршович. – 3 изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
2. Гуляев, А.П. Металловедение/ А.П. Гуляев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
3. Шерман, А.Д. Чугун: справочник/А.Д. Шерман, А.А. Жуков. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
4. Васильев, В.А. Физико-химические основы литейного производства: учебник для ВУЗов/В.А. Васильев. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 334 с.
5. Гиршович, Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках/Н.Г. Гиршович. – М.: Металлургия, 1966. – 562 с.
6. Бунин, К.П. Основы металлографии чугуна/К.П. Бунин, Я.Н. Малиночка, Ю.Н. Таран. – М.: Металлургия, 1969. – 416 с.
7. Лифшиц, Б.Г. Металлография/ Б.Г. Лифшиц. – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.
8. Егоров, А.В. Электрические печи/А.В. Егоров, А.Ф. Моржин. – М.: Металлургия, 1975. – 352 с.
9. Гиршович, Н.Г. Опыт производства синтетического чугуна на Каунасском литейном заводе Центролит/Н.Г. Гиршович. – Вильнюс, Машиностроение, 1961. – 305 с.
10. Еланский, Г.Н., Строение и свойства металлических расплавов: учеб. пособие для вузов/Г.Н. Еланский, Д.Г. Еланский. – М.: МГВИ, 2006. – 228 с.
11. Лякишев, Н.П. Энциклопедический словарь по металлургии: справочное издание. В 2 т/Н.П. Лякишев. – М., «Интермет Инжиниринг», 2000. – Т.2. – 412 с.
12. Воронова, Н.А. Десульфурация чугуна магнием/Н.А. Воронова. – М.: Металлургия, 1980. – 240с.
13. Внепечное рафинирование чугуна и стали/И.И. Борнацкий [и др.] – К.: Техника, 1979. – 168с.

14. Югов, П.И. Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали / П.И. Югов // Сталь.– 1999.– № 4.– С. 28-32.

15. Борнацкий, И.И. Десульфурация металла/И.И. Борнацкий. – М.: Металлургия, 1970.– 320с.

16. Гольдштейн, Я.Е., Модифицирование и микролегирование чугуна и стали/ Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1986. – 310 с.

17. Дубровский, С.А., Исследование физико-химических особенностей выплавки сплавов в индукционных печах/С.А. Дубровский, А.А. Шипельников, А.Н. Роговский//Славяновские чтения «Сварка – XXI век»: сб. науч. тр. 4-5 июня 2009г. – Липецк: ЛГТУ, 2009. – Кн. 1. – С. 45-52.

18. Адрианова, В.П. Краткий справочник металлурга/ В.П. Адрианова. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960. – 369 с.

19.Страница: <http://do.gendocs.ru/docs> – дата обращения: 28.12.2012 г.

20. Страница: <http://www.bibliotekar.ru/slesar> – дата обращения: 8.01.2013 г.

21.Страница: <http://www.ineq.ru/board/27227.html> – дата обращения: 8.01.2013 г.

22.Страница: <http://osvarke.info/> – дата обращения: 18.02.2013 г.

23.Страница: <http://images.yandex.ru/yandsearch/> – дата обращения: 01.04.13 г.

24.Сайт: www.rusnauka.ru/ – дата обращения: 02.03.2013 г.

25. Сайт: www.wikipediya.ru/ – дата обращения: 01.04.2013 г.

Учебное издание

**Шипельников Алексей Александрович
Роговский Александр Николаевич
Кравченко Татьяна Викторовна
Бобылева Наталья Александровна**

**СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ
КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ**

Редактор Черникова Р.А.

Подписано в печать . Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Печ. л. 5,0. Тираж 50 экз. Заказ №
Издательство Липецкого государственного технического университета.
Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ.
398600 Липецк ул. Московская, 30.