

**Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Донбасская государственная машиностроительная академия**

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА

Конспект лекций

**(для студентов специальности 6.05040201
заочной формы обучения)**

Утверждено

на заседании кафедры ТОЛП

Протокол № 14 от 18.12.12 г.

Краматорск 2012

Производство отливок из чугуна. Конспект лекций для студентов специальности 6.05040201 заочной формы обучения / Сост. П. Г. Агравал – Краматорск: ДГМА, 2012. – 30 с.

Данное пособие содержит темы лекций, краткое содержание изучаемых тем, основные теоретические положения, вопросы для самоконтроля и рекомендуемую литературу по дисциплине “Производство отливок из чугуна” для студентов специальности 6.05040201 заочной формы обучения.

Составитель **П. Г. Агравал**, ст. преп.

Отв. за выпуск **В. К. Заблоцкий**, проф.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1 – МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНА.	
КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ	4
ТЕМА 1.1 ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЧУГУНА	4
ТЕМА 1.2 СВОЙСТВА, СТРОЕНИЕ, МАРКИРОВКА, ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЧУГУНОВ	28
РАЗДЕЛ 2 – ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК	32
ТЕМА 2.1 МАТЕРИАЛЫ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА	32
ТЕМА 2.2 ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА	43
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	52

РАЗДЕЛ 1 – МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНА. КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ

МОДУЛЬ 1

Тема 1.1 Формирование структуры чугуна

Лекция 1 Производство отливок из чугуна. Формирование структуры чугуна в процессе первичной кристаллизации в литейной форме. Формообразование графита в чугуне.

Литература: [1], с. 7-53; [2], 125-134; [3], 144, 153-176; [4], 7-17, 25-39, 233-240, 255-256; [5], 3-7, 25-30, 173-175; [6], 12-24, 38-49.

1. Классификация чугунов.
2. Особенности формирования структуры чугунных отливок
3. Диаграмма состояния Fe–C

Методические указания

Свойства чугуна определяются главным образом его структурой, формирование которой является результатом кристаллизации и перекристаллизации. Элементарное представление о процессах, протекающих при кристаллизации жидкого чугуна дает диаграмма состояния Fe–C. Диаграмму Fe–C изображают двойными линиями, отражающими одновременно два крайних случая: истинно равновесное состояние с кристаллизацией углерода только в свободном состоянии в виде графита (сплошные линии) и условно равновесное состояние с кристаллизацией углерода полностью в виде цементита (штриховые линии).

Другим важным процессом является процесс графитизации, определяющий не только количество, форму и распределение графита в чугуне, но и строение его металлической основы или матрицы. Форма графитовых включений является важнейшей характеристикой с точки зрения влияния на механические и технологические свойства чугуна. Основные формы графита: пластинчатая, хлопьевидная, шаровидная и вермикулярная.

В зависимости от состава и характера кристаллизации чугуна первичными фазами его могут быть *аустенит* в случае доэвтектического состава и *цементит* или *графит* (пластинчатый или шаровидный) - в случае заэвтектического.

Классификация чугунов

Чугун - самый распространенный литейный материал: примерно 75% отливок получают из чугуна. Формирование структуры чугуна, его марки и физико-механические свойства, особенности плавки и литья Вы узнаете, изучив курс "ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА".

Чугуны можно классифицировать по различным признакам [1]. Важнейшими из них являются следующие:

I. В зависимости от расположения на диаграмме состояния Fe-C по отношению к эвтектической точке:

- 1 *ДОЭВТЕКТИЧЕСКИЕ*.
- 2 *ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ*.
- 3 *ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИЕ*.

II. В зависимости от состояния и формы углерода, обуславливающего вид излома:

1. *СЕРЫЕ*, в которых углерод находится, главным образом, в свободном состоянии, чаще всего в виде пластинчатого графита, что придает чугуны серый излом.
2. *БЕЛЫЕ*, в которых углерод находится в связанном состоянии в виде карбидов, что обуславливает белый излом.
3. *ПОЛОВИНЧАТЫЕ*, в которых углерод находится как в свободном (графит), так и в связанном состоянии в виде карбидов (цементит). Связанного углерода в них содержится более 0,9%. Чугун в изломе - светло-серый с белыми включениями.
4. *ОТБЕЛЕННЫЕ*, часть сечения в отливках которых состоит из белого чугуна (чаще внешняя), а другая - из серого (внутренняя): иногда бывает наоборот.
5. *КОВКИЕ*, получаемые в результате отжига белых чугунов. Ковкие чугуны, в свою очередь, подразделяются на следующие:
 - а) белосердечные, получаемые за счет окисления и удаления углерода (обезуглероживание отливок). Такие чугуны, называемые европейскими, применяются все реже :
 - б) черносердечные, получаемые за счет распада карбидов с образованием включений свободного углерода - углерода отжига (американские чугуны).
6. *ВЫСОКОПРОЧНЫЕ*, в которых за счет присадок магния или других специальных модификаторов графит принимает шаровидную форму.
7. *С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ*, в которых за счет присадок модификаторов графит принимает червеобразную форму.

III. В зависимости от структуры металлической основы (матрицы), обусловленной различной степенью графитизации:

1. *ПЕРЛИТО-ЦЕМЕНТИТНЫЕ (П + Ц I*.
2. *ПЕРЛИТНЫЕ (П)*.
3. *ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНЫЕ (Ф + П)*.
4. *ФЕРРИТНЫЕ (Ф)*.

IV. В зависимости от химического состава:

1. *ПРОСТЫЕ* (примеси содержатся в обычных пределах):

$C = 3,0...4,0\%$; $Si = 0,5...3,0\%$; $Mn = 0,3...1,5\%$; $S = 0,02...0,15\%$; $P = 0,07...0,5\%$

2. **ЛЕГИРОВАННЫЕ** (хром, никель, медь, титан и др.)

- а) низколегированные - с суммарным содержанием легирующих добавок (не считая Si и Mn) до 2,5 % ;
- б) среднелегированные - от 2.5 до 10% ; Б) высоколегированные - свыше 10%.

V. В зависимости от эксплуатационных свойств:

1. **КОНСТРУКЦИОННЫЕ.**

2. **СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ:**

- а) художественные;
- б) антифрикционные и износостойкие; в) росто- и жаростойкие;
- г) коррозионно-стойкие;
- д) со специальными электромагнитными свойствами и др.

Особенности формирования структуры чугунных отливок

Стали и чугуны являются сложными по составу (многокомпонентными) сплавами, но в основном состоят из двух главнейших компонентов: железа и углерода. Поэтому их с известным приближением можно рассматривать как двойные железо-углеродистые сплавы [2].

Диаграмма состояния Fe–C

Свойства чугуна определяются главным образом его структурой, формирование которой является результатом кристаллизации и перекристаллизации. Элементарное представление о структурных составляющих, образующихся при кристаллизации сплавов в равновесных условиях, дают диаграммы состояния. Они представляют собой термодинамические характеристики, определяющие состав и количество структурных составляющих в зависимости от температуры в условиях равновесия.

На рис.1 и 2 показаны диаграммы состояния двойных Fe-C сплавов. Полная диаграмма состояния (рис.1) была опубликована в 1964 г[1]

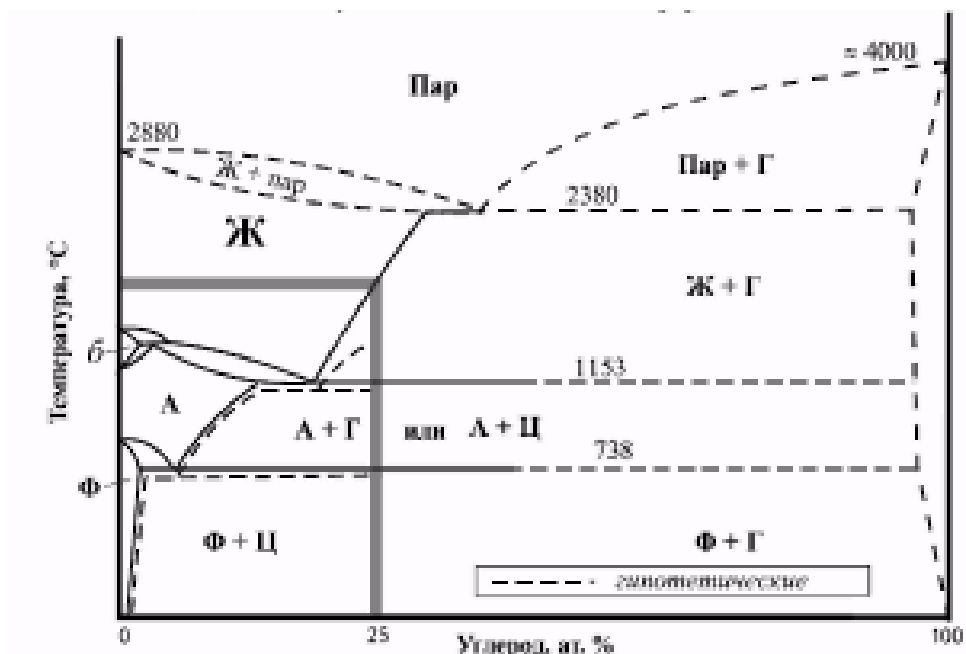


Рис. 1. Полная диаграмма состояния сплавов Fe–C

Диаграмму Fe–C изображают двойными линиями, отражающими одновременно два крайних случая: истинно равновесное (стабильное) состояние с кристаллизацией углерода только в свободном состоянии в виде графита (Г) и условно равновесное (метастабильное) состояние с кристаллизацией углерода полностью в связанном состоянии в виде цементита (Ц).

Промежуточные состояния как неравновесные даже в условном смысле этого слова не представлены на диаграмме состояния, несмотря на их практическое значение.

В результате стабильной кристаллизации и перекристаллизации образуются серые чугуны, а при метастабильной - белые; смешанный характер кристаллизации приводит к получению половинчатых чугунов.

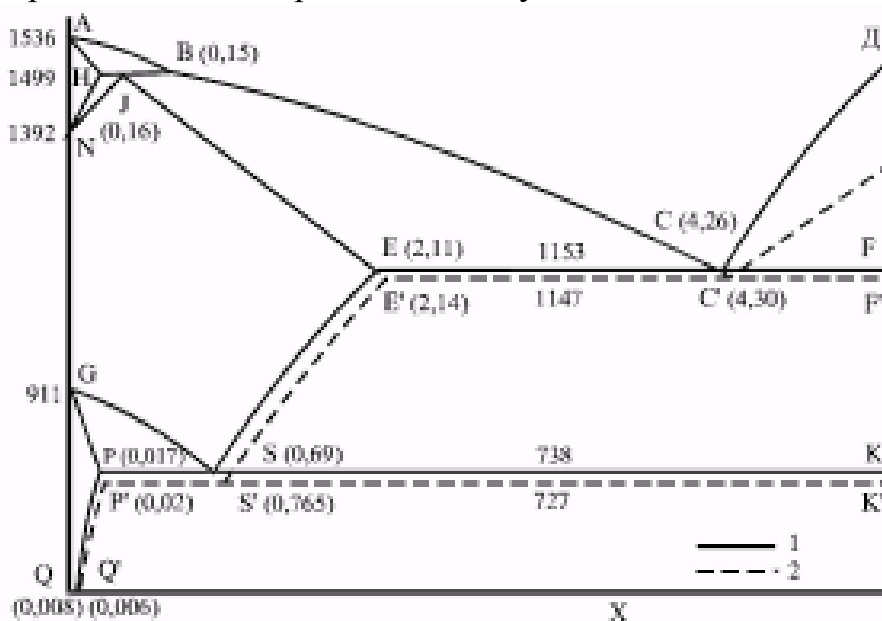


Рис. 2. Двойная диаграмма состояния Fe–C сплавов: 1 - стабильное, 2 - метастабильное

Обычно графитная система изображается на диаграммах пунктиром, цементитная - сплошными линиями. Н.Г. Гиршович вполне обоснованно считает это методически ошибочным, так как графитная система как истинно стабильная является на диаграммах основной. Поэтому на рис. 1 и 2 приняты обозначения стабильной системы Fe–C сплошными линиями, метастабильной Fe–Fe₃C -пунктирными [1], стабильному состоянию равновесия. Что касается наблюдаемого в сплавах графита, то он является продуктом распада цементита, наступающего после выделения последнего, поэтому графиту нет места на диаграмме[2].

Компонентами системы Fe-C являются железо и углерод, а основными фазами – аустенит, феррит и цементит.

В доэвтектических чугунах (с содержанием углерода X, составляющим $E < X < C$ или $E' < X < C'$) с понижением температуры из жидкого расплава выпадает аустенит (А), в то время как в заэвтектических (с содержанием углерода более C или C') - графит (Г) либо цементит (Ц). Конец кристаллизации чугунов всегда характеризуется эвтектическим превращением. Следовательно, чугун представляет сплав железа с углеродом, характеризующийся наличием эвтектического превращения - стабильного (графитного) или метастабильного (цементитного).

В реальных чугунах положение всех критических точек изменяется в зависимости от содержания других элементов (легирующих, технологических или примесей) и скорости охлаждения.

Положение чугуна относительно эвтектической точки C (C' определяется величиной углеродного эквивалента $C_3^э$ или степенью эвтектичности S_C):

$$C_3^э = C_{общ} + 0,3[Si], \quad (1)$$

или

$$C_3^э = C_{общ} + 0,3([Si] + [P]), \quad (2)$$

$$S_C = \frac{C_{общ}}{4,26 - 0,3([Si] + [P])}, \quad (3)$$

где $C_{общ}$ – содержание углерода (связанного и свободного), %; [Si], [P] – содержание соответственно кремния и фосфора, %.

Только в зависимости от величины $C_3^э$; или S_C реальные чугуны делятся на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические [3].

Углеродный эквивалент в реальных чугунах для температуры ликвидус составляет

$$C_3^A = [C] + 1/4 [Si] + 1/2 [P]. \quad (4)$$

То же для жидкотекучести

$$C_3^J = [C] + 1/3 [Si] + 1/2 [P]. \quad (5)$$

Следовательно, величина углеродного эквивалента C_3^J изменяется от химического состава чугуна по-разному-в зависимости от определяемой характеристики.

В общем случае структура чугуна состоит из первичной фазы (аустенита для доэвтектических; графита или цементита для заэвтектических) и эвтектики, которая в случае цементитной системы называется ледебуритом.

Эвтектическое превращение происходит на линии EF (E' F') по схемам:



Количество выделившихся при затвердевании фаз и соотношения между ними в условиях равновесия (стабильного или метастабильного) определяется из диаграммы состояния по правилу отрезков. Сама эвтектика² состоит из:

а) аустенита и цементита (метастабильная);
 б) аустенита и графита (стабильная). Соотношение между компонентами эвтектики в условиях равновесия также определяется по правилу отрезков. При охлаждении в твердом состоянии из аустенита вследствие понижения растворимости продолжает выделяться избыточный углерод в виде графита по линии ES или цементита по линии E' S¹. При достижении температуры на линиях PSK или P'S'K' этот процесс сопровождается эвтектоидным превращением с образованием стабильного (Ф + Г) или метастабильного (Ф + Ц = Перлит) эвтектоида.

При дальнейшем охлаждении в подкритической области из феррита выделяются весьма небольшие количества углерода по линиям PQ и P'Q'. Следовательно, структурная диаграмма железоуглеродистых сплавов выглядит следующим образом (рис. 3):

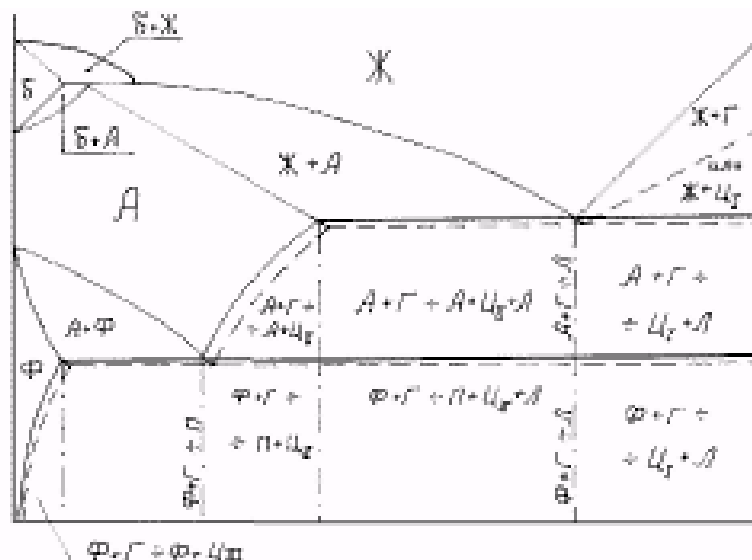


Рис.3. Структурная диаграмма состояния Fe–C и Fe–Fe₃C сплавов

Как следует из структурной диаграммы (рис. 3), основными структурными составляющими системы железо-углерод являются феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц), графит (Г), перлит (П) и ледебурит (Л).

ФЕРРИТ - твердый раствор внедрения углерода в α - железе. Кристаллическая решетка - объемно-центрированная кубическая (ОЦК). Плотность при 20°C составляет 7,87 г/см³. Углерод находится в растворе в виде атомов (ионов) и связан металлической связью с атомами железа. Феррит является наиболее мягкой пластичной составляющей. Механические свойства его зависят от чистоты сплава и величины зерна и составляют:

$$\sigma_B = 300 \dots 350 \text{ МПа}; \delta = 30 \dots 50 \% : \text{НВ} = 80 \dots 90;$$

$$\sigma_S = 100 \dots 120 \text{ МПа}; \text{КСУ} = 2,5 \dots 3,0 \text{ МДж/м}^2.$$

Быстро охлажденный из области высоких температур Ф может удержать значительное количество углерода (максимальная растворимость которого составляет 0,02% при 738°C). Полученный пересыщенный раствор склонен к старению - выделению избыточной фазы (углерода), в результате чего повышается прочность. Высокая пластичность Ф обусловлена тем, что пластические деформации (сдвиги) происходят по кристаллографическим плоскостям, наиболее плотно насыщенных атомами. Решетка феррита имеет 6 различных (непараллельных) плоскостей сдвига, обуславливающих высокую деформационную способность.

АУСТЕНИТ - также ионизированный твердый раствор внедрения углерода в γ -железе (с ГЦК решеткой). Плотность А колеблется в пределах 7,874...7,830 г/см³ в зависимости от содержания углерода. В аустените достаточно велика скорость диффузии углерода. Коэффициент диффузии при 1000°C равен (1700...2300) 10^{-3} см/сутки. Аустенит достаточно пластичен вследствие наличия нескольких плоскостей сдвига,

характерных для ОЦК и ГЦК решеток. Предел прочности аустенита составляет 400 МПа; твердость HB = 200.

ЦЕМЕНТИТ представляет собой метастабильную фазу с узкими пределами гомогенности по углероду. Незначительно колеблющийся химический состав цементита описывается формулой Fe_3C , которая отражает его лишь приближенно и не удовлетворяет правилу валентности. По мере усовершенствования методики исследования состава было установлено, что содержание углерода в цементите близко к 6,67%, но не является строго постоянным.

Исходя из необычного стехиометрического соотношения Fe и C в цементите и колеблющегося состава, А.А. Байков предложил, что Ц является не химическим соединением, а твердым раствором переменного состава. В реальных чугунах цементит подобно Ф и А является одновременно твердым раствором замещения и внедрения с металлическими связями.

По свойствам цементит, имеющий орторомбическую решетку, является твердым и хрупким веществом (твердость HRC = 70...75 или HB = 800; $\sigma_B = 3500$ МПа, удлинение практически отсутствует). Плотность цементита составляет $7,69 \text{ г/см}^3$.

ГРАФИТ-одна из трех модификаций углерода, неорганический цепной полимер с плоскими молекулами. Кристаллическая решетка графита - гексагональная некомпактная (ГНК) с послойным расположением атомов. В слоях между атомами действуют сильные ковалентные (или гомеополярные) связи с энергией порядка 420...500 кДж/моль.

Связь атома со своими 3-мя соседями по слою осуществляется посредством трех электронов, в то время как четвертый электрон является общим для всего слоя. Этим обусловлен металлический характер связи и электропроводность графита.

Между слоями графита действуют слабые ван-дер-ваальсовы (молекулярные) силы, энергия связи которых составляет всего 4,2...12,6 кДж/моль. В соответствии с этим твердость и прочность графита вдоль главной гексагональной оси много больше, чем в перпендикулярном направлении. Поэтому Г обладает смазочными свойствами, обусловленными слабой связью между слоями. При растворении Г в жидком железе пластинки Г легко расщепляются на слои, однако полное разрушение ГНК решетки происходит при температуре около 4000°C (см. рис.1). Плотность Г составляет $2,22 \text{ г/см}^3$, предел прочности на сжатие около 2000 МПа.

ПЕРЛИТ - эвтектоидная смесь из 88,5% феррита состава точки P' (C = 0,02%, рис. 2) и 11,5% цементита состава точки K (C = 6,67%), образующаяся в результате распада аустенита при температуре 727°C. Под

количеством П в структуре чугуна понимают средний процент площади, занимаемой П на микрошлифе в основной металлической матрице.

В серых чугунах мерой количества П может служить количество связанного углерода, увеличение которого (следовательно, и количества П) приводит к упрочнению чугуна.

$C_{св}, \%$	0	0,20	0,28	0,48	0,52	0,78
$\sigma_B, \text{МПа}$	86	115	147	176	240	290

Твердость П составляет $HB=200\ldots 250$, относительное удлинение $\delta=6\ldots 8\%$, плотность (расчетная) примерно $7,85 \text{ г/см}^3$.

ЛЕБЕБУРИТ - эвтектическая смесь из 52,3% аустенита состава точки E' ($C=2,14\%$) и 47,7% цементита состава точки F' ($C=6,67\%$), образующаяся в результате эвтектического превращения при температуре 1147°C (рис. 2). Эвтектическая точка C' , соответствующая 4,30% углерода для чистых сплавов железо-цементитной системы, под влиянием примесей или легирующих элементов может сдвигаться только влево по шкале концентрации углерода, а также вверх или вниз по шкале температуры. Поэтому для технических марок чугунов эвтектическую температуру определяют экспериментально.

Л. представляющий собой пластинку Ц. пронизанную слоями А, является весьма твердой и хрупкой составляющей в чугуне.

Однако, пользуясь структурной диаграммой и диаграммой состояния, следует учитывать, что реальные условия затвердевания отличаются от равновесных. Поэтому диаграммы состояния могут дать представление о составе и количестве (объеме) структурных составляющих. Суждение о форме образующихся фаз и механизме процессов кристаллизации на основе диаграмм состояния сделано быть не может.

Лекция 2 Графитизация и карбидообразование в чугуне. Сфероидизация в чугуне. Формирование структуры чугуна.

Литература: [1], с. 7-53; [2], 125-134; [3], 144, 153-176; [4], 7-17, 25-39, 233-240, 255-256; [5], 3-7, 25-30, 173-175; [6], 12-24, 38-49.

1. Кристаллизация графита
2. Формообразование графита
3. Кристаллизация и затвердевание первичных фаз и эвтектики
4. Процессы перекристаллизации (вторичная кристаллизация)

Кристаллизация графита

Свойства чугуна определяются главным образом его структурой. Формирование структуры чугуна является результатом кристаллизации и

перекристаллизации. Наиболее важным процессом при этом является графитизация, определяющая не только количество, форму и распределение графита в чугуне, но и строение его металлической основы или матрицы [1].

ГРАФИТИЗАЦИЕЙ называется процесс кристаллизации графита, происходящий как непосредственно при затвердевании и охлаждении чугуна в форме, так и при последующем отжиге в твердом состоянии. Графитизация при затвердевании характерна для отливок из серого чугуна, графитизация при отжиге - в основном для ковкого и лишь отчасти для серого (в случае термической обработки) [4]. Графитизация подчиняется общим законам кристаллизации и формирует структуру чугуна в процессе ее первичной и вторичной кристаллизации.

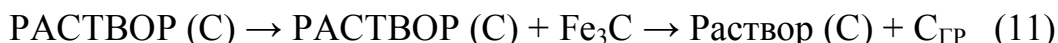
ПРОЦЕСС ГРАФИТИЗАЦИИ является частным случаем кристаллизации, многие вопросы которого до сих пор являются спорными. Твердо установлена лишь *диффузионная природа* процесса. иначе нельзя представить, каким образом разрозненные атомы углерода из раствора или цементита собираются и объединяются в отдельные поликристаллические включения графита. Главным пунктом расхождения в существующих теориях графитизации является вопрос о возможности непосредственной кристаллизации графита из раствора (твердого или жидкого) [4].

Процессы графитизации. согласно существующим теориям, можно представить по следующим схемам.

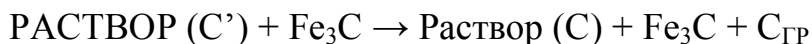
СХЕМА 1. Графит выделяется непосредственно из пересыщенного раствора (твердого или жидкого):



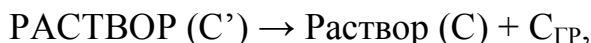
СХЕМА 2. Графит выделяется за счет распада карбидов, в частности цементита, предварительно выделившихся из раствора:



или



или



где C и C' - концентрации углерода в метастабильном и стабильном растворах.

Каждая из приведенных схем процессов графитизации состоит из ряда промежуточных звеньев (элементарных процессов). В случае *схемы 1* такими процессами являются:

- 1) диффузия углерода в растворе вследствие создающегося градиента химического потенциала (в частности, концентрации);
- 2) кристаллизация углерода в виде Γ на имеющихся зародышах.

В случае *схемы 2* идут следующие процессы:

- 1) выделение цементита из раствора;
- 2) диссоциация цементита;
- 3) растворение углерода;
- 4) диффузия углерода;
- 5) кристаллизация углерода в виде Γ .

Схема 2 фактически приходит к схеме 1, так как выделяющийся из метастабильного раствора Ц затем распадается и является *промежуточной фазой*.

Некоторые ученые полагали, что скорость графитизации определяется скоростью "*узкого звена*", т.е. того элементарного процесса, который характеризуется наименьшей скоростью. Однако это справедливо лишь в том случае, когда скорость "*узкого звена*" *несоизмеримо* мала по сравнению со скоростями смежных процессов. В остальных же случаях скорость графитизации в целом определяется скоростями всех тех последовательных процессов, скорости которых соизмеримы.

Приведенные схемы графитизации поддерживаются не всеми теоретиками. Одни ученые признают выделение графита *только непосредственно* из раствора, а другие - *только путем распада предварительно выделившихся карбидов*. При этом некоторые из них считают время существования предварительно выделившихся карбидов весьма незначительным, так что по их представлению карбиды распадаются даже в момент своего выделения. Третья группа ученых признает возможность всех приведенных схем графитизации.

Формообразование графита

Форма Γ является важнейшей характеристикой с точки зрения влияния на механические и технологические свойства чугуна. Основные формы Γ :

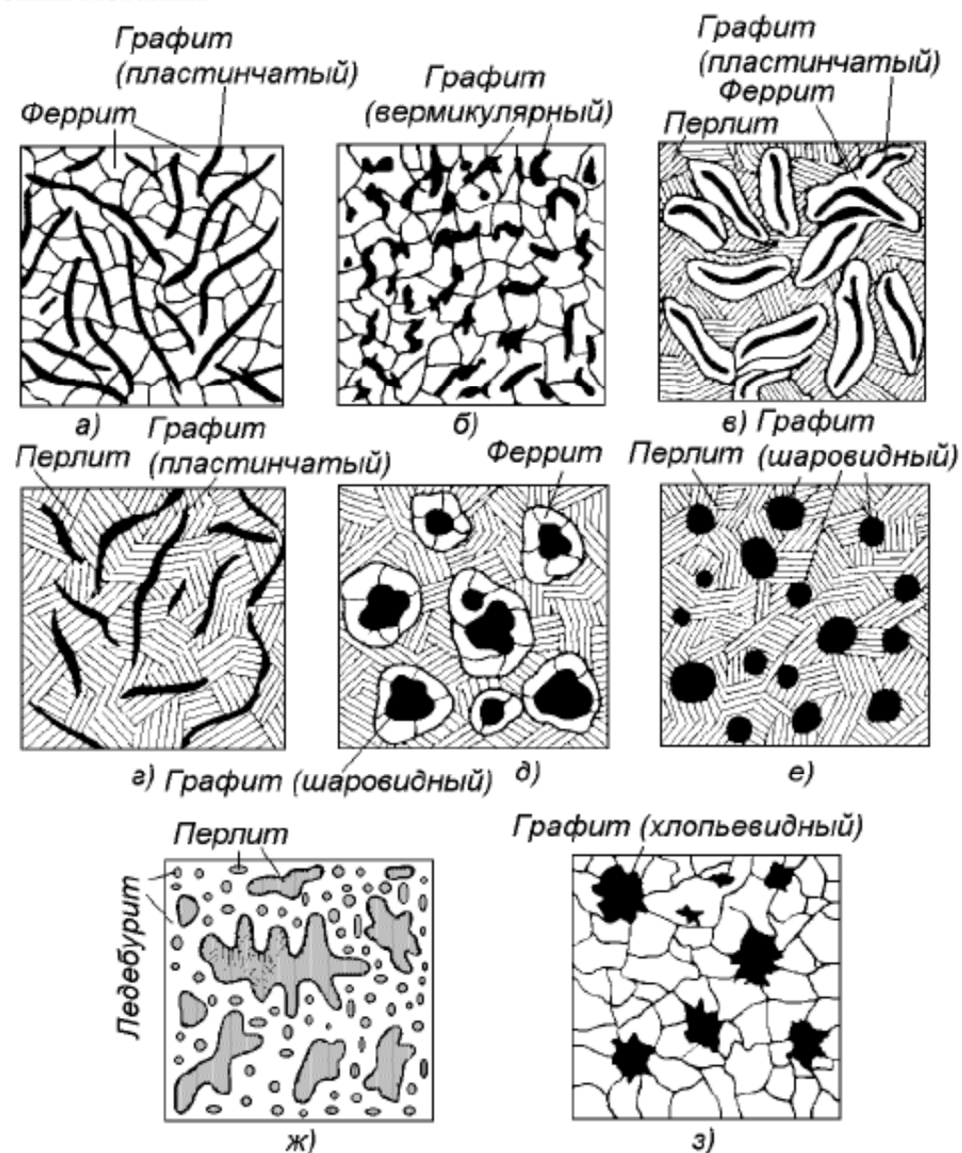


Рис.4. Основные формы графита в сером чугуने

1. Пластинчатая (в сером чугуне):
 - а) междендритная;
 - б) неориентированная.
2. Гнездообразная, или хлопьевидная (в ковком чугуне).
3. Шаровидная (в высокопрочном чугуне или в ковком при высоком соотношении S:Mn).
4. Вермикулярная (червеобразная).

Реальные формы Г значительно разнообразнее. Так, *пластинки* Г могут быть прямыми и в разной степени изогнутыми; *хлопьевидный углерод отжига* - различно разветвленным; *шаровидный графит* - с разной огранкой и в разной степени компактный. Следует также различать Г, кристаллизующийся в эвтектическом зерне, а также распределение включений Г по длине, толщине и т.д.

Отсюда становится очевидным, насколько многообразны явления графитизации и с какими трудностями связано создание правильной и

всеобъемлющей теории формообразования Г. Создание единой теории усложняется еще тем обстоятельством, что почти все указанные формы Г могут быть получены как в процессе кристаллизации, так и в процессе отжига.

Все многообразие гипотез, объясняющих формообразование Г в чугунах, Н.Г. Гиршович [1] разбивает на 3 группы:

1 группа - формообразование связано с природой, формой и строением зародышей;

2 группа - формообразование определяется воздействием механических Факторов;

3 группа - формообразование определяется соотношением скоростей роста граней Г.

Рассмотрим более подробно каждую группу.

ГРУППА ГИПОТЕЗ 1. Многие исследователи считают, что включения, кристаллизующиеся в кубической системе (MgS , Mg_3N_2 , Mg_2O , MgO), способствуют образованию *шаровидного* графита, в то время как включения гексагонального или другого строения (SiO_2 , SiO , SiC) служат зародышами для *пластинчатого* графита, хотя обе формы Г характеризуются одним и тем же строением кристаллической решетки. Вместе с тем, против них свидетельствует ряд факторов. Например, шаровидный Г образуется при присадке Mg тем легче, чем меньше содержание S в чугуне, в то время как с точки зрения зародышевого действия сульфидов (в частности, MgS) должно быть наоборот. Кроме того, гипотезы, пытающиеся увязать форму Г с природой, строением и формой зародышей, не в состоянии объяснить влияние температуры, скорости охлаждения и многих других факторов на форму Г.

ГРУППА ГИПОТЕЗ 2. Эти гипотезы связывают форму графита с воздействием физических сил, к которым в первую очередь относятся силы поверхностного натяжения и сопротивление среды.

Сторонники гипотезы сил поверхностного натяжения опираются на тот факт, что при присадке Mg, Ce и других глобулизирующих элементов поверхностное натяжение повышается в 1,5 раза ($1,0 \dots 1,6 \cdot 10^{-2}$ Н/см), в то время как присадки деглобулизирующих элементов (Pb, Sb и др.) или выдержка и перегрев чугуна после присадки магния понижают поверхностное натяжение до уровня, при котором образуется пластинчатый Г. Критическим значением межфазного поверхностного натяжения (между Г, А и жидким раствором) является $1,2 \cdot 10^{-2}$ Н/см. Такое влияние глобулизирующих элементов на поверхностное натяжение объясняется обычно удалением поверхностно-активных газов и серы (рис. 5). Поэтому поверхностное натяжение сначала *повышается*, а потом *снижается* при дальнейшем увеличении присадки Mg, т.е. его избыток, остающийся после связывания газов и серы, оказывается поверхностно-активным, понижающим поверхностное натяжение чугуна. Однако эта гипотеза не может объяснить тот факт, что при вводе других

дегазирующих и обессеривающих элементов, например Al, повышающих поверхностное натяжение чугуна, вовсе не образуется шаровидная форма графита.

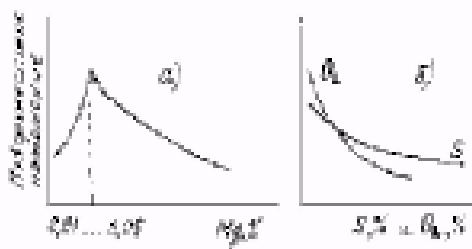


Рис 5. Влияние Mg (а), серы и кислорода (б) на поверхностное натяжение чугуна.

Следовательно, одного высокого поверхностного натяжения оказывается *недостаточно* для кристаллизации графита в шаровидной форме. К тому же теория поверхностного натяжения игнорирует то обстоятельство, что шаровидный Г отличается от пластинчатого не только по форме, но и по текстуре.

Необоснованной оказывается и гипотеза, по которой форма Г определяется характером и сопротивлением среды. Она не может объяснить, например, почему спель кристаллизуется в *пластинчатой* форме в идеальной изотропной жидкой среде обычного чугуна и в *шаровидной* форме - при присадке Mg или других элементов.

Вместе с тем сопротивление среды в ряде случаев оказывает большое влияние на форму Г, ограничивая скорость роста быстро растущих граней Г. Это уменьшает разницу в скоростях роста отдельных граней и Г приобретает более компактную округлую форму. Этим и объясняется то, что при кристаллизации в твердом состоянии (при отжиге белого чугуна) образуется не пластинчатый, а компактный хлопьевидный или шаровидный Г. Вследствие анизотропности среды и наличия границ зерен, а также неполного равенства скоростей роста граней, Г может принимать различную форму и включения получают в различной степени разветвленными. Однако сопротивление среды при этом влияет не непосредственно, а через изменение скоростей роста различных граней графита.

ГРУППА ГИПОТЕЗ 3. По мнению Н.Г. Гиршовича, гипотезы этой группы являются наиболее обоснованными. Они объясняют разные формы Г различием скоростей роста его отдельных граней; причиной этого различия являются как внутреннее строение и анизотропность Г, так и влияние внешних условий.

Значительную роль в этом отношении играют примеси, незначительные количества которых могут резко изменить огранку кристаллов. Mg, Ce, Th, а в некоторых случаях Ca и даже S (в больших концентрациях) способствуют образованию *шаровидного* графита; Pb, Bi, Al, Ti, H₂ и S (в средних концентрациях), наоборот, благоприятствуют кристаллизации

графита в *пластинчатой* форме; Те и его комбинации с Се способствуют образованию компактного и притом разветвленного графита, напоминающего углерод отжига ковкого чугуна, в особенности при низком содержании С, Si и S.

Механизм влияния примесей весьма разнообразен: они могут механически внедряться в решетку Г или избирательно адсорбироваться на гранях Г, соответственно изменяя скорость их роста. Они могут также отталкиваться к границам растущего кристалла и, образуя своеобразный барьер, тем самым уменьшать скорость роста всего кристалла или их колонии в целом. Во всех случаях примеси оказывают различное влияние на скорость роста отдельных граней кристалла, изменяя его форму. Даже в случае изменения общей скорости роста кристалла, например, при образовании барьера, это сказывается прежде всего на грани, растущей с максимальной скоростью: ее скорость более резко уменьшается и постепенно выравнивается со скоростями роста других граней, пока, наконец, лимитирующим фактором не станет диффузия углерода через барьер примесей.

В этом случае форма Г будет определяться только соотношением скоростей доставки атомов углерода с разных сторон, а кристаллы становятся аллотриоморфными.

Кристаллизация и затвердевание первичных фаз и эвтектики

В зависимости от состава и характера кристаллизации чугуна первичными фазами его могут быть *аустенит* в случае доэвтектического состава и *цементит* или *графит* (пластинчатый или шаровидный) - в случае заэвтектического. Первичные фазы кристаллизуются из пересыщенных жидких растворов непосредственно, следовательно, для их кристаллизации характерны большая скорость конвективной диффузии и малое сопротивление среды, что создает благоприятные условия для свободного развития первичных фаз.

Аустенит кристаллизуется обычно в форме дендритов, характер которых сохраняется, несмотря на последующую перекристаллизацию (т.е. вторичную кристаллизацию). Каждый дендрит является монокристаллом, растет из своего центра, поэтому количество и размеры дендритов определяются числом зародышей, которое, в свою очередь, зависит от жидкого состояния металла и величины переохлаждения. Последняя при прочих равных условиях обуславливается скоростью охлаждения: чем больше скорость теплоотвода, тем больше объемная, а при данном числе зародышей и линейная скорость кристаллизации, и тем разветвленное дендри-ты.

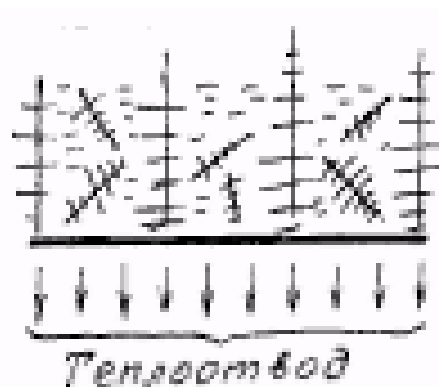


Рис.6 Схема роста дендритов

Если процесс кристаллизации не успевает следовать за скоростью теплоотвода, то температура понижается, переохлаждение увеличивается и число зародышей возрастает, что ведет к измельчению дендритов. При этом дендриты имеют далеко не одинаковые условия для роста.

В наиболее благоприятных условиях в этом отношении находятся дендриты, главные оси которых вытянуты *вдоль теплового потока*. Благодаря этому происходит частичное выклинивание одних дендритов другими (рис.6), в особенности в наружных слоях отливки.

В центральных же частях, где тепловод имеет меньший температурный градиент и не столь резко выражено его направление, дендриты имеют более равномерную ориентацию.

В процессе кристаллизации как расплав, так и выпадающий аустенит содержат различное количество углерода (рис.7.а), содержание которого возрастает как в аустените, так и в жидком расплаве, о чем свидетельствуют градиенты концентрации углерода 1' 2' 3' и 1" 2" 3". Последние слои аустенита содержат -2% С, а оставшийся расплав - 4,3% С. Одновременно развивается диффузионный перенос углерода как в жидкости, так и в аустените в направлении от фронта кристаллизации, обогащенного углеродом (рис. 8,а). Однако в реальных условиях, далеких от равновесных, выравнивание состава протекает не до конца. Поэтому в аустените развивается "прямая" внутрикристаллическая (дендритная) ликвация. Однако высокая скорость диффузии углерода (до $2300 \cdot 10^{-3}$ см/сутки) ограничивает развитие ликвации.

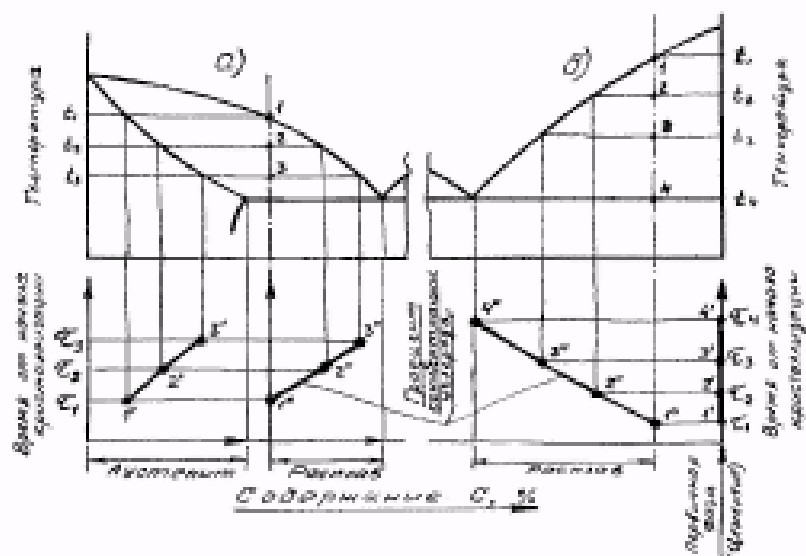


Рис.7. Схема изменения содержания углерода в первичной фазе и жидком расплаве доэвтектических (а) и заэвтектических (б) чугунов

При кристаллизации *заэвтектического* чугуна первичной фазой может быть *цементит* или *графит* в зависимости от скорости охлаждения, состава чугуна и других факторов. В этом случае жидкий расплав на фронте кристаллизации обедняется углеродом (рис. 7,б) вследствие выделения высокоуглеродистой фазы. Это приводит к диффузионному переносу углерода по направлению раздела "цементит (графит) - жидкость" или, что то же самое, к диффузии Fe от фронта кристаллизации вглубь жидкости (рис.8,б). И в этом случае вследствие несовершенства диффузии в пограничном слое жидкости образуется градиент концентрации, что способствует дендритной кристаллизации цементита. Действительно, в зависимости от условий первичный цементит может кристаллизоваться в виде дендритов или пластин. Однако последние по существу также состоят из плоских дендритов, оси которых, разрастаясь, образуют монолитные пластины; ориентация и размер их зависят от условий кристаллизации (наличия зародышей, скорости теплоотвода и других факторов). Когда маточный раствор по мере кристаллизации первичной фазы (А либо Ц, Г) достигает определенного состава, начинается *эвтектическое превращение* (или эвтектический распад жидкости), являющееся наиболее важным этапом кристаллизации чугуна. В процессе эвтектического превращения определяется основной тип получаемого чугуна (белый, серый, высокопрочный или половинчатый), а также характер графита и величина эвтектического зерна. *Особенностью процесса* является *полифазный* характер кристаллизации, т.е. одновременное или почти одновременное выделение из жидкого раствора нескольких, в простейшем случае двух фаз: для Fe-C сплавов такими фазами являются аустенит и одна из высокоуглеродистых фаз - цементит или графит.

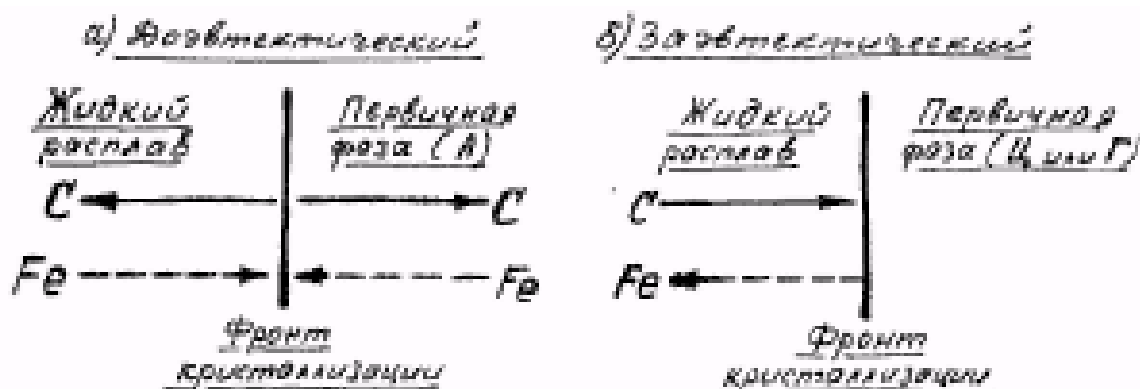


Рис.8. Направление диффузии С и Fe в первичных фазах и жидком расплаве

Эвтектическая кристаллизация может привести к образованию как характерной для эвтектики дисперсной структуры, так и структуры грубого конгломерата (по терминологии А.А.Бочвара).

При *быстром* охлаждении кристаллизующиеся фазы чередуются, что приводит к образованию *дисперсной структуры*, характерной для эвтектики.

При *медленном* охлаждении состав жидкого раствора на межфазных поверхностях успевает выравниваться, поэтому обе фазы *продолжают свободно расти* до взаимной встречи, образуя грубый конгломерат кристаллитов. Следовательно, характерная для эвтектики дисперсная структура далеко не всегда сопровождает эвтектическое превращение.

В большинстве случаев кристаллизация метастабильной эвтектики ($A + Ц = Л$) начинается на цементите (инициируется цементитом), на котором зарождаются кристаллы аустенита. Ведущая фаза (Ц) характеризуется большой линейной скоростью роста и выдвигается при кристаллизации вглубь жидкого раствора, опережая несколько рост второй фазы (А). Это имеет своим последствием снижение концентрации углерода у фронта кристаллизации и возникновение зародышей аустенита и дальнейший рост их. Кристаллизация А, в свою очередь, вызывает рост концентрации углерода на межфазовой границе и создает условия для дальнейшей кристаллизации Ц. Следовательно, налицо одновременно - попеременный рост составляющих эвтектики фаз.

Из этого следует, что для получения тонкого эвтектического строения необходима достаточная большая скорость охлаждения, чтобы диффузия не успевала выравнивать состав у фронта кристаллизации.

Медленный теплоотвод ограничивает число центров кристаллизации из-за малого переохлаждения и позволяет диффузии выравнивать состав раствора у фронта кристаллизации. Поэтому обе фазы растут одновременно, образуя грубый конгломерат. При этом в чугунах с низким содержанием углерода эвтектический А может полностью

кристаллизоваться на первичном, а эвтектика как структурная составляющая тогда вовсе отсутствует.

При стабильной кристаллизации, в противоположность ледебуриту, аустенитно-графитная эвтектика выделяется в виде сферических агрегатов, причем ведущей может быть любая эвтектическая фаза (в зависимости от переохлаждения). При малых скоростях охлаждения (а значит и малом переохлаждении) из жидкости сначала выделяется графит, затем аустенита при больших - наоборот, сначала аустенит, а затем графит. При очень больших переохлаждениях графит вовсе не выделяется из жидкости непосредственно (кристаллизация переходит в метастабильную - с выделением цементита, а образуется в результате распада выделяющегося цементита.

Отсюда следует, что в зависимости от переохлаждения меняется характер ведущей фазы, а также получаются серые, белые и половинчатые чугуны.

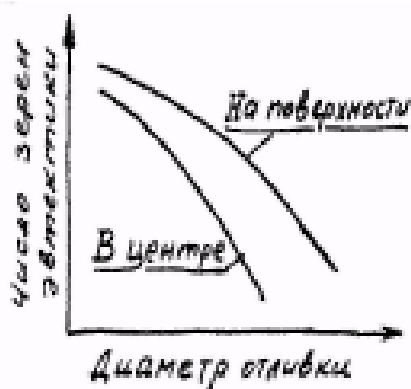


Рис. 9. Влияние скорости охлаждения на размер эвтектического зерна

Таким образом, первичная кристаллизация чугуна состоит из двух этапов: *выделение первичной фазы* (А - в доэвтектических чугунах, Ц или Г-в заэвтектических) и *распад маточного раствора*. Скорость теплоотвода оказывает большое влияние на кристаллизацию как первичных фаз, так и эвтектики: чем *больше скорость охлаждения* при прочих равных условиях, *тем больше переохлаждение* расплава, *тем больше число зародышей* и тем, следовательно, *мельче дендриты первичных фаз*, *тем слабее развиты эвтектические колонии и дисперснее их внутреннее строение*.

Как следует из рис. 9, эвтектика измельчается с увеличением скорости охлаждения: чем меньше толщина отливки, тем мельче эвтектическое зерно. Вдобавок, зерно мельче на поверхности отливок, чем в центре. Подобным образом действуют другие технологические факторы, ускоряющие охлаждение отливок или увеличение другим путем числа зародышей в период кристаллизации (например, модифицирование, вибрация, центробежные силы и др.)

Вместе с тем. увеличение скорости охлаждения и величины переохлаждения изменяет также *микроморфологию* эвтектического зерна,

повышая тенденцию к образованию *лучисто-перистого* или *лучисто-сферолитного* строения колоний.

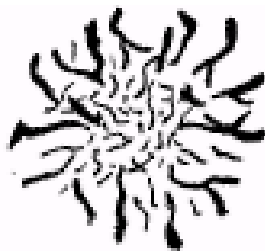


Рис. 10. Влияние скорости охлаждения на включения графита

По этой же причине графит в наружной части эвтектических колоний (рис.10) оказывается более крупным и грубым, чем в начале процесса кристаллизации, а следовательно, при больших скоростях кристаллизации и большем переохлаждении. Следовательно, теплоотвод является ведущим фактором как монофазной, так и полифазной кристаллизации, определяя в последнем случае скорость роста не только эвтектической колонии в целом, но и ее фаз[1]. Из сказанного выше вытекает, что в чугунах следует различать *первичное аустенитное зерно*, образующееся при кристаллизации первичной фазы, и *литейное, или эвтектическое, зерно*, образующееся при кристаллизации эвтектики. Аустенитное и эвтектическое зерна образуются на разных этапах одного и того же процесса первичной кристаллизации. Их следует отличать от зерна излома, которое обнаруживается при разрушении чугуна и, следовательно, проходит по наиболее слабым местам в сечении отливок[4].

Некоторые особенности затвердевания отливок из чугуна как сплава с эвтектическим превращением можно продемонстрировать на примере отливок из доэвтектического чугуна в песчаной и металлической формах.

Как следует из рис.11, кристаллизация чугуна в песчаных формах протекает *объемно*. Выделение первичного аустенита начинается практически по всему сечению одновременно и только после его завершения начинается кристаллизация эвтектики. Процессы затвердевания первичного аустенита и эвтектическое превращение происходят преимущественно *последовательно*.

В случае металлической формы (при интенсивном теплоотводе) волны обоих процессов накладываются друг на друга, так что эвтектическое превращение начинается в наружных слоях отливки до того, как

кристаллизация первичного аустенита закончилась в центре.

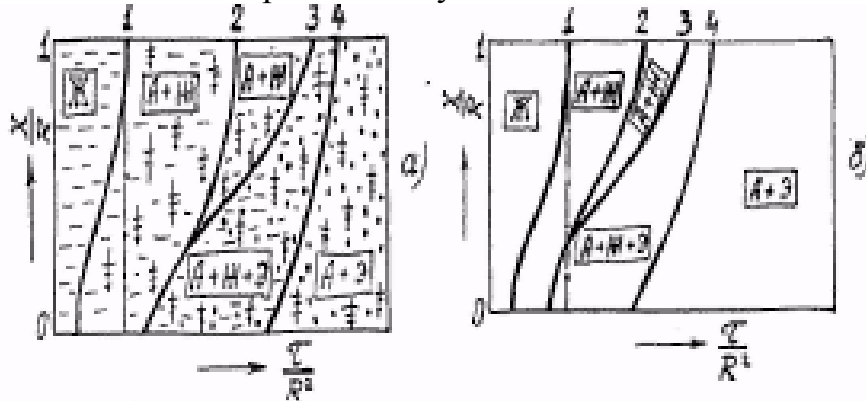


Рис. 11. Кинетика кристаллизации аустенита и эвтектики по сечению отливок (а - в песчаной форме, б - в металлической форме):

1-начало кристаллизации аустенита; 2-конец кристаллизации аустенита; 3-начало кристаллизации эвтектики; 4-конец кристаллизации эвтектики.

Следовательно, при затвердевании отливки в песчаной форме имеет место преимущественно последовательное выделение первичной фазы и эвтектического превращения, а в металлической форме - преимущественно совмещенное.

Процессы перекристаллизации (вторичная кристаллизация)

Перекристаллизация может быть разделена на процессы, протекающие:

- а) в аустенитной области;
- б) в области $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения;
- в) в ферритной области.

Выделение вторичных фаз (графита - по линии ES или цементита - по линии E'S', рис. 2) происходит вполне аналогично первичным с той лишь разницей, что наличие последних инициирует и облегчает перекристаллизацию. Поэтому вторичные фазы откладываются обычно на первичных и эвтектических фазах.

В *серых* доэвтектических чугунах из первичного и эвтектического аустенита, окружающего эвтектический графит, при медленном охлаждении выделяется *вторичный графит* и откладывается на уже имеющемся эвтектическом. В *белых* чугунах, кристаллизовавшихся по метастабильной системе, из аустенита выпадает *вторичный цементит*, который откладывается на эвтектическом. Когда содержание углерода в аустените снизится до 0,69% (0,765%), что соответствует точкам S (S') на диаграмме состояния Fe - C (рис. 2), начинается второй этап перекристаллизации в области превращения $\gamma \rightarrow \alpha$.

На этом этапе формируется *матрица* (металлическая основа) чугуна. В зависимости от полноты превращения как первичного, так и

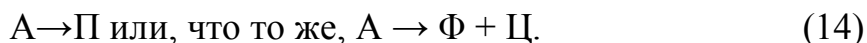
эвтектического аустенита, а также от схемы превращения (по стабильной или метастабильной системе) матрица чугуна может получиться *аустенитной, мартенситной, игольчато-трооститной (бейнитной), перлитной, ферритной* или с различным соотношением этих фаз.

Во всех чугунах - сером, высокопрочном, ковком - вначале вне зависимости от переохлаждения практически без инкубационного периода³³ начинает выделяться графит, который откладывается на уже имеющихся включениях. Таким образом, графит в этом случае всегда является ведущей фазой превращения. Затем начинает выделяться феррит и откладываться вокруг графита по границам или внутри зерен аустенита. Следовательно, идет превращение:

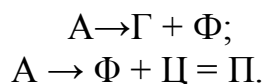


В сером чугуне этот процесс может завершиться полностью в стабильном эвтектоидном интервале при достаточной выдержке с получением чисто ферритной матрицы и структуры ($\Phi + \Gamma$).

В высокопрочном чугуне накладываются интервалы стабильного и метастабильного равновесия, поэтому процесс образования феррита никогда не протекает до конца. В этом чугуне превращение идет по схеме:



В сером и ковком чугунах все большее значение приобретает реакция (14), которая имеет место при больших переохлаждениях в области ниже стабильного эвтектоидного превращения и идет наряду с реакцией (13):



В результате получается ферритно-перлитная матрица со структурой ($\Phi + \Pi$) или ($\Phi + \Psi$), а общая структура чугуна соответствует формуле ($\Phi + \Pi + \Gamma$) или ($\Phi + \Psi + \Gamma$).

При увеличении скорости охлаждения весь аустенит в сером чугуне переходит в перлит:



Получается перлитная матрица (Π) или ($\Phi + \Psi$), а общая структура чугуна становится ($\Pi + \Gamma$) или ($\Phi + \Psi + \Gamma$).

Дальнейшее увеличение скорости охлаждения приводит к превращению аустенита в более дисперсную структуру:

$A \rightarrow$ Бейнит или $A \rightarrow$ Мартенсит.

Что касается эвтектического и заэвтектического серого чугуна, то в нем процессы перекристаллизации протекают по аналогичным схемам с тем лишь добавлением, что количество графита в структуре растет пропорционально содержанию углерода в чугуне [5].

Процессы, протекающие после *распада аустенита* в критической области, носят такой же характер, как и процессы в надкритической области. Это - *выделение избыточных фаз* (Γ или Π) из феррита, *распад цементита*, а также процессы уменьшения поверхностной энергии системы - *коалесценция; сфероидизация и коагуляция*. Хотя количество избыточных фаз, выпадающих из феррита (по линии PQ - третичный Γ , по линии P'Q' - третичный Π), весьма невелико, они могут играть иногда большую роль, например, при дисперсионном твердении или охрупчивании чугунов (в частности, при образовании "белого излома" в ковком чугуне).

Процессы – коалесценция, сфероидизация и коагуляция - являются следствием естественного стремления системы к уменьшению поверхностной энергии.

Коалесценция – собирательная рекристаллизация, состоящая в объединении соседних кристаллов в один

Сфероидизация (от сфера и греческого *eidos* – вид) – скругление, придание шаровидной формы.

Коагуляция (от латинского *coagulaſio* - сгущение) - укрупнение частиц в дисперсных и особенно коллоидных системах

Задание на самостоятельную работу

1. Ознакомится с ГОСТ 3443-87 “Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры”.
2. Повторить диаграммы состояния систем Fe–C, Fe–C–Si, Fe–Fe₃C.

Вопросы для самоконтроля

1. Чугуны. Классификация по форме включений графита и металлической матрице.
2. Процессы формирования структуры в чугуне. Диаграмма состояния Fe–C.
3. Формообразование графита при первичной кристаллизации.
4. Графитизация чугуна. Гипотезы о механизмах и кинетике процесса графитизации чугуна.
5. Графитизирующие модификаторы и способы их введения в жидкий чугун.
6. Сфероидизирующие модификаторы и способы их введения в жидкий чугун.
7. Формирование структуры матрицы чугунов при кристаллизации.

8. Влияние условий кристаллизации на форму и размер включений графита.

9. Влияние структурных составляющих на механические свойства чугуна.

Тема 1.2 Свойства, строение, маркировка, особенности получения и применения различных видов чугунов

Методические указания

Серый чугун с пластинчатым графитом. Маркировка. Влияние химического состава, скорости охлаждения, температуры заливки и других факторов на структуру и свойства серого чугуна. Область применения и технология получения серого чугуна. Технологические особенности получения отливок из серого чугуна.

Классификация ковких чугунов. Общая характеристика, маркировка. Область применения и технология получения ковкого чугуна. Технологические особенности получения отливок из ковкого чугуна.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ). Общая характеристика, маркировка. Область применения и технология получения ВЧШГ. Технологические особенности получения отливок из ВЧШГ.

Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом (ВЧВГ). Общая характеристика. Область применения и технология получения ВЧВГ. Технологические особенности получения отливок из ВЧВГ.

Белый чугун. Общая характеристика, область применения и технология получения белого чугуна. Технологические особенности получения отливок из белого чугуна.

Легированные чугуны. Общая характеристика, маркировка. Область применения и технология получения легированного чугуна. Технологические особенности получения отливок из легированного чугуна.

Лекция 3 Серый чугун с пластинчатым графитом. Ковкий чугун. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом.

Литература: [2], 151-163; [3], 217-222, 261-270; [4], 45-67, 81-91; [5], 176-178.

Лекция 4 Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом. Белый чугун. Легированные чугуны.

Литература: [2], 151-163; [3], 217-222, 261-270; [4], 45-67, 81-91; [5], 176-178.

Влияние различных факторов на кристаллизацию и графитизацию чугуна

Кристаллизация и графитизация чугуна определяются составом металла, его жидким состоянием, скоростью охлаждения отливки, термообработкой и другими факторами, варьируя которыми, можно получить ту или иную структуру, а следовательно, и свойства чугуна[6].

Общие закономерности влияния элементов

Химические элементы оказывают различное влияние на матрицу (металлическую основу) и графитные включения в чугуне. По силе воздействия на графитизацию наиболее важные элементы можно расположить в следующий примерный ряд:

Al, C, Si, Ti, Ni, Si, P, Co, Zr, Nb, W, Mn, Mo, Cr, V, S, Mg, Ce, Te, B
(+) (-)

Элементы слева способствуют графитизации, справа - препятствуют, в середине - являются нейтральными³⁷. Однако влияние каждого из элементов на графитизацию зависит от многих факторов (содержания других примесей, скорости охлаждения и др.). Все это усложняет процесс и часто приводит к результатам явно несопоставимым из-за различия в условиях исследований. До сих пор оказываются несостоятельными все попытки свести многообразие действующих факторов к какому-нибудь одному при объяснении механизма влияния элементов на процесс графитизации.

Одни исследователи пытаются увязать механизм графитизирующего влияния элементов с их воздействием на положение критических точек диаграмм состояния³⁸. Другие это влияние связывают с активностью углерода и легирующих элементов, третьи связывают коэффициент диффузии углерода и железа со скоростью графитизации.

Видимо, наиболее правильной в этом отношении является попытка установления связи между графитизирующим влиянием элементов и положением их в периодической системе Д.И. Менделеева, а следовательно, и с их электронным строением, хотя установить количественное выражение этой связи пока не удастся.

Согласно этой гипотезе, переходные элементы³⁹, имеющие на 3d - уровне *меньше* электронов, чем железо (Sc, Ti, V, Cr, Mn, должны *препятствовать* графитизации, а имеющие большее число электронов (Co, Ni, Cu) должны способствовать графитизации. Такая зависимость подтверждается практикой. Однако в отношении Ti (и, вероятно, Sc) наблюдается отступление от общей закономерности. *77 способствует графитизации*, но это объясняется тем, что очень большое сродство элемента (как и Zr, отчасти Nb) к углероду и некоторым другим неметаллам приводит к образованию практически *нерастворимых соединений, служащих зародышами для графита*. Противоположная картина наблюдается в отношении других рядов элементов (Al, Si, P, S), в которых по мере достройки 3p-уровня М-оболочки графитизирующая способность падает, а не увеличивается.

Влияние углерода и кремния

Наиболее важным в практическом отношении легирующим элементом является кремний, который вместе с углеродом оказывает наибольшее влияние на структуру и свойства чугуна. Изменением содержания этих элементов практически добиваются той или иной степени графитизации и желаемой структуры чугуна. С увеличением содержания одного из них, как правило, снижают содержание другого.

Графитизирующее влияние углерода объясняется тем, что он увеличивает число зародышей. Si как элемент, расширяющий область γ -раствора, постепенно выклинивает область γ -раствора. при этом сдвигает вверх и влево эвтектическую и эвтектоидную точки (т.е. в сторону более высоких температур и более низких концентраций углерода). Фактически Si интенсивно вытесняет C из растворов. Влияние Si на точку эвтектоидного превращения S (S') показано на рис. 5.

Благотворное влияние Si и C на графитизацию чугуна в процессе кристаллизации иллюстрируется рис 6. Резко выражены два критических содержания Si: I - соответствует переходу белого излома в серый; II - максимальному количеству графита в чугуне.

Задание на самостоятельную работу

Свойства различных видов чугунов, технологические особенности их получения, изготовления отливок. Изучение ГОСТ 1412-85, 1215-79, 7293-85, 7769-82.

Вопросы для самоконтроля

1. Серый чугун. ГОСТ 1412-85. Общая характеристика, структура. Маркировка.
2. Влияние отдельных элементов на свойства серого чугуна. Область применения.
3. Технология получения отливок из серого чугуна.
4. Ковкий чугун. ГОСТ 1215-79. Общая характеристика, структура. Маркировка. Влияние отдельных элементов на свойства. Область применения.
5. Технологические особенности получения отливок из ковкого чугуна.
6. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом. ГОСТ 7293-85. Общая характеристика, структура. Маркировка. Влияние отдельных элементов на свойства. Область применения.
7. Технология получения отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

8. Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом. Общая характеристика, структура. Маркировка. Влияние отдельных элементов на свойства. Область применения.

9. Технологические особенности получения отливок из высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом.

10. Белый чугун. Общая характеристика, структура. Маркировка. Влияние отдельных элементов на свойства. Область применения.

11. Технологические особенности получения отливок из белого чугуна.

12. Легированные чугуны. ГОСТ 7769-82. Общая характеристика, структура. Маркировка. Влияние отдельных элементов на свойства. Область применения.

13. Технологические особенности получения отливок из легированного чугуна.

РАЗДЕЛ 2 – ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК

МОДУЛЬ 2

Тема 2.1 Материалы, теория и технология выплавки чугуна.

Методические указания

При получении жидкого чугуна для отливок необходимо учитывать особенности этих отливок и требования к чугуну, т. е. должны быть обеспечены не только заданные механические свойства в образцах, но и микроструктура и твердость в рабочих узлах отливок, соответствующие требованиям технических условий.

При выборе технологии получения чугуна необходимо учитывать его химический состав, метод шихтовки и наследственные свойства шихтовых материалов, плавильные агрегаты (вагранки, электропечи) и режим плавки в них, а также внепечную обработку чугуна.

Одновременно с химическим составом на формирование структуры и свойств чугуна в отливке сильно влияют шихтовые материалы, их свойства и содержание в шихте.

Лекция 5 Теория и технология выплавки чугуна в вагранках

1. Материалы для выплавки чугуна
2. Расчет шихты для выплавки чугуна
3. Технология плавки чугуна в вагранках

Литература: [2], 311-325; [4], 138-203; [5], 34-53, 62-100;
[8], 41-85, 88-93.

Материалы для выплавки чугуна

При получении жидкого чугуна для отливок необходимо учитывать особенности этих отливок и требования к чугуну, т. е. должны быть обеспечены не только заданные механические свойства в образцах, но и микроструктура и твердость в рабочих узлах отливок, соответствующие требованиям технических условий.

Для корпусных отливок станков характерно сочетание массивных рабочих узлов с относительно тонкими стенками. Получение перлитной структуры, мелкого графита и высокой твердости в массивных сечениях отливки и исключение отбела в тонких стенках должны быть обеспечены при высокой квазиизотропии чугуна. Это достигается путем использования наиболее совершенной технологии получения чугуна.

При выборе технологии получения чугуна необходимо учитывать его химический состав, метод шихтовки и наследственные свойства шихтовых материалов, плавильные агрегаты (вагранки, электропечи) и режим плавки в них, а также внепечную обработку чугуна.

Известна закономерность — укрупнение включений графита при повышении углеродного эквивалента. Снижение углеродного эквивалента до 3,4 при принятом отношении C/Si в ваграночном и электропечном чугунах не обеспечивает получения относительно мелких включений графита ($l_{\text{гр}} < 250$ мкм), соответствующих требованиям ТУ.

При использовании шихты, состоящей в основном из собственных возвратов и 30% стальной стружки, даже при индукционной плавке не происходит существенного размельчения графита в образцах указанных сечений. Увеличение углеродного эквивалента значительно влияет на снижение склонности чугуна к отбеливанию, характеризуемой глубиной отбеленной зоны технологической пробы. Чугуны индукционной плавки того же химического состава, что и ваграночные чугуны, обладают большей склонностью к отбеливанию.

Для изготовления крупных отливок I и II классов группы *б* без холодильников в зависимости от массы и толщины направляющих используют чугун с пониженным содержанием углерода (2,9—3,1%), выплавленный на шихте, содержащей до 40—50% стального лома. Иногда этот чугун подвергают модифицированию. На большинстве заводов эти чугуны легируют 0,2—0,4% Cr, на заводе «Сиблитмаш» 0,15—0,3% Ni, на ЛСО им. Свердлова Ni + Cu = 0,4%.

При изготовлении отливок различной массы широко используют холодильники. В этом случае применяют чугун с относительно высоким содержанием углерода (3,1—3,3%) и низким содержанием стального лома в шихте (20—30%). Масса отливок и толщина направляющих, при которых целесообразно использовать холодильники, на каждом заводе разные. Сделать по этому вопросу какие-либо обобщающие выводы и дать рекомендации не представляется возможным.

Приведенные данные показывают, что для стабильного получения мелкого графита ($l_{\text{гр}} < 250$ мкм) в относительно толстых сечениях отливки применяют следующие методы:

- 1) снижение C_{Σ} и C/Si в чугуне (при ваграночной плавке это допустимо в известных пределах и связано с ухудшением литейных свойств чугуна);
- 2) повышение скорости охлаждения с помощью холодильников.

В ряде случаев литейщики вынуждены использовать второй метод, хотя он и связан с организационными трудностями, повышением трудоемкости и опасностью появления специфических дефектов в отливках (см. главу I).

Одновременно с химическим составом на формирование структуры и свойств чугуна в отливке очень влияют шихтовые материалы, их свойства и

содержание в шихте. В первую очередь это относится к стальному лому и доменным чугунам.

Доменные чугуны. Качество отливок, литейные и механические свойства чугуна при прочих равных условиях зависят от происхождения и свойств доменного чугуна, используемого в шихте и подтверждено многолетней практикой. Наследственность свойств сказывается в тем большей степени, чем больше содержание доменного чугуна в шихте.

По данным Л. И. Леви, на механические свойства чугунов одинакового химического состава (по основным элементам) оказывает существенное влияние содержание в них азота, которое колеблется в значительных пределах в зависимости от происхождения доменного чугуна, используемого при плавке.

Исследования литейных доменных чугунов различных заводов показывают, что грубые включения графита в этих чугунах вызывают кристаллизацию чугуна вторичной плавки с повышенной степенью графитизации и крупным графитом. Это объясняется значительной устойчивостью при плавке и перегреве включений графита исходных материалов, являющихся зародышевой фазой в жидком металле.

Весьма важно, чтобы каждый литейный цех получал доменный чугун с определенного металлургического завода. Но и в этом случае приходится считаться с тем, что на одном и том же металлургическом заводе при плавке в различных доменных печах или при изменении режима доменной плавки получают чугуны с различными наследственными свойствами. Для исключения влияния этого фактора в литейных цехах Швейцарии, где особое внимание уделяется качеству чугуна для станочного литья, в ваграночную шихту вводят, как правило, одновременно чугун двух-трех разных сортов, причем один из них гематитовый [59].

Такая многокомпонентная шихтовка связана с существенными производственными трудностями, поэтому можно рекомендовать следующий оправдавший себя метод. Поступающий на завод в вагонах доменный литейный чугун рассортировывают на отдельные партии, в каждую из которых подбирают чугуны одинакового класса и группы и с содержанием кремния, отличающимся не более $\pm 0,1$ % от среднего для этой партии. Чугуны каждой партии укладывают так, что чугун из каждого вагона образует слой в «пироге». Чугун со склада в литейный цех подается магнитной шайбой, которой стремятся забрать чушки из максимального числа различных слоев. Это обеспечивает при шихтовке наиболее полное перемешивание чушек из различных вагонов.

Вопрос о влиянии доменного чугуна на свойства чугуна ваграночной плавки приобретает еще большее значение в связи с заменой литейного доменного чугуна передельным.

Для того чтобы при замене литейного доменного чугуна передельным обеспечить стабильные свойства выплавляемого чугуна и предотвратить ухудшение качества отливок, необходимо иметь достоверные сведения о

структуре и свойствах получаемых чугунов при использовании в шихте различных доменных чугунов.

При замене литейного доменного чугуна передельным:

- 1) существенно увеличивается жидкотекучесть чугуна (рис. 29);
- 2) несколько повышается склонность чугуна к отбеливанию (рис. 30).
- 3) несколько уменьшается количество графита, размельчаются его включения и повышается дисперсность перлита; эти изменения в основном относятся к «мягким» чугунам, по составу приближающимся к эвтектическим; микроструктура «жестких» чугунов ($C_3 = 3,5 - 3,8$), используемых для корпусных отливок станков, существенно не отличается;
- 4) незначительно повышаются (на 5—8%) механические свойства «мягкого» чугуна; не отмечается сколь-либо существенного изменения прочности «жестких» чугунов.

Объяснить указанную разницу в наследственных свойствах можно тем, что в передельном чугуне по сравнению с литейным меньше содержится грубого первичного графита, который не успевает раствориться при расплавлении и перегреве чугуна. Эти включения графита могут являться центрами кристаллизации эвтектического графита.

Замена в ваграночной шихте литейного чугуна передельным заставляет кроме наследственных свойств учитывать и технологические особенности, которые влияют на полученные результаты.

Стальной лом. При увеличении содержания стального лома в шихте уменьшается количество углерода в ней и в выплавленном чугуне. Однако при расчетах следует учитывать, что с увеличением содержания стали повышается степень науглероживания металла в процессе плавки.

На науглероживание стальной части шихты значительно влияют размеры кусков стального лома, так как этот процесс происходит главным образом в зоне вагранки выше фурм. Мелкие, тонкостенные куски стального лома плавятся в более высоких зонах печи, поэтому науглероживание увеличивается; массивные, толстостенные куски лома плавятся в более низких зонах и в результате науглероживание уменьшается. Этим объясняется установленное практикой правило — для выплавки низкоуглеродистых чугунов использовать толстостенные массивные куски стального лома.

Увеличение содержания стального лома в шихте способствует получению чугуна с более дисперсной структурой и более высокими механическими свойствами, чем у чугунов такого же химического состава, выплавленных с меньшим содержанием стального лома в шихте.

При близких значениях C_3 более высокие механические свойства имеют чугуны, выплавленные с увеличенным содержанием стального лома в шихте (рис. 27). Эти чугуны отличаются дисперсным перлитом и мелким графитом.

Так, при введении в шихту относительно большого количества ферросилиция¹ с содержанием до 18—20% кремния возрастает опасность получения значительной неравномерности содержания кремния в выплавляемом чугуне. Избежать этого можно путем тщательного взвешивания предварительно раздробленного ферросилиция, уменьшения массы каждой завалки, усреднения состава в копыльнике достаточной емкости.

2. Расчет шихты для выплавки чугуна

Расчет шихты состоит из трех последовательных этапов.

1) Установление требований, предъявляемых к составу выплавляемого сплава по содержанию основных элементов и примесей, т.е. определение регламентируемого химического состава сплава.

2) Определение расчетного состава сплава. На этом этапе предварительно выбирают перечень шихтовых материалов из имеющихся в наличии. Вводят ограничения на использование этих материалов в шихте. Фиксируют химический состав каждой из составляющей шихты.

В зависимости от плавильного агрегата для выплавки сплава определяют значение угара расчетных элементов.

3) Составление расчетных уравнений и их решение. На этом этапе составляют балансовые уравнения по всем расчетным элементам и видам шихтовых материалов. В результате их решения получают соотношения между составляющими шихты, которые при выбранном способе плавки обеспечивают заданный химический состав сплава.

Исходными данными для расчета шихты являются:

- 1) требуемый химический состав сплава;
- 2) химический состав составляющих металлозавалки;
- 3) угар элементов при плавке.

В общем случае шихта состоит из n — компонентов, каждый из которых имеет определенную концентрацию i -го элемента K_i . т.е. множество концентраций i -го элемента M_{ki} .

$$M_{ki} = \{K_{i(1)}, K_{i(2)}, \dots, K_{i(n)}\}. \quad (1)$$

Число таких множеств равно числу расчетных элементов. Для решения задачи расчета шихты необходимо определить массовую долю каждого из компонентов шихты, т.е. X_1, X_2, \dots, X_n .

В процессе плавки концентрация элемента изменяется, происходит либо угар, либо пригар элемента. Если угар принимают по опытным данным как среднестатистический, то среднее содержание i -го элемента в шихте определяют из формулы

$$K_{i(ш)} = K_{i(ж)} \cdot (100 / (100 \pm \Delta x_i)), \quad (2)$$

где $K_{i(ш)}$ — среднее содержание i -го элемента в шихте;

¹ Рекомендуется ферросилиций ФС18, так как при повышении содержания кремния более 18—20% материал становится немагнитным и транспортные операции усложняются.

$K_{i(ж)}$ - требуемое содержание i -го элемента в жидком сплаве;

Δx_i , - угар (-), пригар (+) i -го элемента во время плавки, %. Однако угары элементов из различных компонентов шихты существенно отличаются друг от друга. Так, например, в процессе плавки угар кремния у переплавных чугунов составляет 6%, а угар кремния у литейных чугунов значительно выше и колеблется в зависимости от марки в пределах 6,5 ... 11,4%.

В таких случаях шихту рассчитывают не по средним угарам, а по их конкретным значениям для каждого из компонентов путем определения приведенного содержания элемента в шихте.

$$K_{i(j)}^{np} = K_{i(j)} \cdot (100 / (100 \pm \Delta x_i)), \quad (3)$$

где $K_{i(j)}^{np}$ - приведенное содержание элемента в шихте.

Затем значение $K_{i(j)}^{np}$ используется в системе (1) вместо $K_{i(u)}$. По среднему составу шихты рассчитывают массовые доли ее компонентов x_1, x_2, \dots, x_n .

Этот расчет можно производить» аналитическим, графоаналитическим или методом подбора путем решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} x_1 K_{i(1)} + x_2 K_{i(2)} + \dots + x_n K_{i(n)} = K_{i(u)}; \\ x_1 K_{q(1)} + x_2 K_{q(2)} + \dots + x_n K_{q(n)} = K_{q(u)}; \\ x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1, \end{cases} \quad (4)$$

где x_i – массовая доля компонента шихты, %;

$K_{q(i)}$ – массовая доля элемента q в i -м компоненте шихты, %.

Существуют несколько способов расчета шихты:

- 1) аналитический метод;
- 2) графический метод;
- 3) графоаналитический метод;
- 4) метод последовательного корректирования;
- 5) расчет шихты методом подбора;
- 6) расчет шихты при помощи вычислительной техники.

Технология плавки чугуна в вагранках

Вагранка

Вагранка представляет собой плавильную печь шахтного типа. На рис. 90 изображена вагранка со стационарным копильником. Вертикальный цилиндрический кожух 9, изготовленный из листовой стали толщиной 8—12 мм, установлен на подовой плите 19. Внутри кожух футерован огнеупорным материалом 10 толщиной 250—300 мм. Подовая плита установлена на четырех колоннах 20. В центре подовой плиты имеется круглое отверстие для удаления остатков плавки. Отверстие закрыто двумя полукруглыми дверцами 21, подвешенными на петлях

Специальный затвор исключает возможность раскрытия дверок. Иногда дверцы подпирают снизу стойкой 22. В кожухе вагранки имеются отверстия для загрузочного окна 12, рабочего окна 16, фурм 7, соединительной летки 6.

Часть вагранки от загрузочного окна до подовой плиты называют шахтой 13, а выше загрузочного окна — трубой 11. Ниже загрузочного окна (на 0,8—1,2 м) шахту часто выкладывают не огнеупорными, а чугунными пустотелыми блоками 14, которые хорошо противостоят ударам загружаемого металла. Под 18 набивной. Вагранку разжигают дровами через рабочее окно, которое перед началом плавки плотно закрывают дверцей 17.

Копильник 4 предназначен для сбора необходимого количества чугуна. Копильник, как и вагранка, имеет кожух и футеровку. Жидкий металл из копильника выпускают через летку 2 по желобу 1; шлак — через шлаковую летку 3. Съёмный свод 5 облегчает условия ремонта. Воздух вначале поступает в фурменный пояс 8 и затем по патрубкам — к фурмам. Шиберы 15, установленные на патрубках, позволяют регулировать расход воздуха на фурмы. На верхней части дымовой трубы, выходящей из здания, устанавливают искрогаситель, предназначенный для улавливания раскаленных частиц и пыли, выбрасываемых из вагранки.

На рис. 91 показан водоохлаждаемый искрогаситель, позволяющий на 80% очистить ваграночные газы от пыли. Очистка газов происходит при их соприкосновении с потоком воды. В корпусе 3 искрогасителя размещены две системы орошения водой. Первая система включает верхний 2 и нижний 4 коллекторы, а вторая — зонт 6, коллектор 8 и соединительные трубы 7. Горячие ваграночные газы по выходе из трубы 9 вагранки отклоняются зонтом к корпусу искрогасителя. Холодная вода из трубопровода / заполняет зонт и поступает в искрогаситель через сливной патрубок 5 на конце зонта. Во время работы вагранки по зонту (по всей окружности) стекает поток воды, через который проходят ваграночные газы. Все крупные и средние частицы пыли отделяются потоком воды от газов и увлекаются вниз к сливной трубе 10. Вода, сливающаяся из коллекторов 2 и 4, дополнительно очищает ваграночные газы, что обеспечивает высокий КПД установки.

При непродолжительных плавках (3—4 ч) футеровка выгорает лишь выше фурм. В этом случае ремонт плавильного пояса сводится к заделыванию выгоревших мест новым огнеупорным кирпичом и применением раствора из огнеупорной глины. При более продолжительных плавках выгорание футеровки настолько значительно, что требуется полная замена футеровки в районе плавильного пояса.

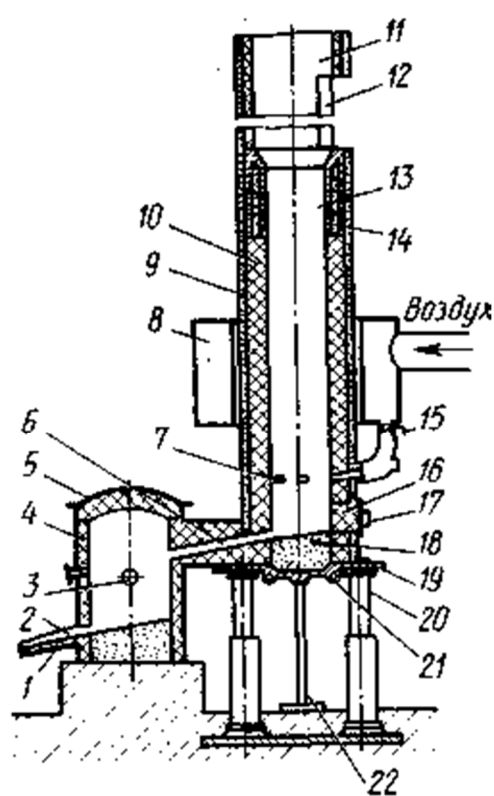


Рис. 90. Вагранка

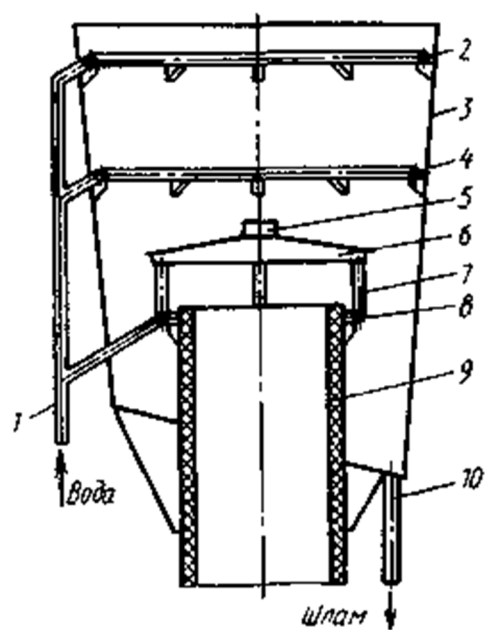


Рис. 91. Искрогаситель вагранки

Лекция 6 Теория и технология выплавки чугуна в электрических дуговых и индукционных печах, в пламенных печах

1. Плавка чугуна в электрических дуговых и индукционных печах
2. Плавка чугуна в пламенных печах

Литература: [2], 325-334; [4], 204-209, 218-226; [5], 100-155.

Плавка чугуна в электрических дуговых и индукционных печах

Для плавки чугуна применяют дуговые и индукционные высокочастотные электрические печи. Электрические печи могут работать как на твердой, так и на жидкой завалке. При работе на твердой завалке используются электродуговые печи, применяемые для плавки стали, емкостью 0,5—5,0 т. Для работы на жидкой завалке применяются электродуговые печи емкостью 3 и 10 т.

Электроплавильные печи применяются главным образом для получения более высокого перегрева чугуна, введения легирующих добавок, доводки чугуна по химическому составу. Реже электроплавильные печи применяются для удаления вредных примесей: фосфора и серы. Поэтому большинство электрических печей для плавки чугуна имеет кислую огнеупорную футеровку.

Плавка чугуна на шихте из стального лома происходит с добавкой науглероживателей в количестве 5—10% от веса металла. В качестве науглероживателей применяют древесный уголь, кокс, электродный бой и др.

Древесный уголь при плавке усваивается металлом до 40%, кокс до 50% и электродный бой до 70%. Часть углеродистых материалов загружают вместе с шихтой, а другую часть засыпают на поверхность жидкого металла.

Выдержка металла зависит от качества науглероживателя и состава чугуна, который необходимо получить. Для различных составов чугунов выдержка колеблется в пределах от 80 до 20 мин.

После окончания науглероживания в ванну добавляют подогретые куски ферросилиция и марганца, нагревают металл до заданной температуры и разливают в формы.

При плавке высокоуглеродистого чугуна в печь загружают чушки чугуна, литники, чугуновый лом. Для компенсации выгорающего углерода добавляют науглероживатель в количестве 0,3—0,4% от веса шихты. Усвоение углерода при этом процессе плавки равняется 40—50%. Переплавка производится под одним шлаком, кислым или основным.

Для получения соответствующего состава шлака в печь добавляют флюсы (в %):

Для печей с кислой футеровкой		Для печей с основной футеровкой	
Кварцевого песка	80%	Плавикового шпата	25%
		Молотого кокса	15%
Извести	20%	Извести	60%

В случае необходимости получения низкоуглеродистого чугуна в плавку добавляют соответствующее количество стального лома. После расплавления металла снимают образовавшийся шлак и, в зависимости от футеровки печи, наводят новый шлак.

Плавку чугуна необходимо вести по возможности быстрее. Угар элементов при плавке в электродуговых печах находится в следующих пределах: для печей с кислой футеровкой 5—10% С; 15—20% Mn; Si может пригорать на 0,2—0,3%; для печей с основной футеровкой угар Si составляет 5—10%; Mn 10—15%; содержание С изменяется.

Легирующие добавки можно вводить в чугун в различные периоды плавки. При небольшом количестве добавок их, как правило, вводят в печь в конце плавки; при большем количестве добавок их можно вводить частично вместе с шихтовыми материалами и частично — в конце плавки.

Состав шлаков при плавке на твердой завалке зависит от футеровки печи (табл. 60):

Таблица 60

Футеровка печи	Содержание в %						
	SiO ₂	CaO	MgO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	CaC ₂
Кислая	55–65	5–25	1–3	5–10	3–7	5–10	–
Основная	15–20	50–60	–	1–2	1–2	5–8	2–3

В качестве плавильных агрегатов в чугунолитейных цехах в основном нашли распространение индукционные тигельные печи промышленной частоты благодаря следующим преимуществам: печи не требуют преобразователей тока и относительно просты по устройству, а электрический коэффициент полезного действия их высок (66—75%). Расход электроэнергии на плавку и перегрев чугуна составляет 650—700 кВт·ч/т. Теплота генерируется равномерно в самом металле без местного его перегрева, и жидкий металл интенсивно перемешивается благодаря воздействию электромагнитных сил. Это обеспечивает минимальный угар элементов, быстрое растворение добавок и равномерность металлической ванны по химическому составу.

К числу недостатков этих печей относится малая скорость плавления твердой завалки, что снижает ее к. п. д. Поэтому наиболее эффективным с точки зрения производительности и расхода электроэнергии является метод плавки на «болоте», т. е. при каждом выпуске из печи выдается в разливочный ковш количество чугуна, составляющее 30—40% ее емкости. Затем в

жидкую ванну загружают соответствующее количество твердых шихтовых материалов. При этом уровень жидкого металла поднимается до верха тигля, и печь непрерывно работает с высоким к. п. д.

К числу недостатков индукционных печей промышленной частоты относится большая потребность в производственной площади, чем при установке вагранок с такой же общей производительностью. Это объясняется значительной площадью, занимаемой трансформатором и батареей конденсаторов.

Для дуплекс-процесса наиболее широко используют канальные индукционные печи промышленной частоты. Вследствие особенностей конструкции и метода генерирования теплоты эти печи при работе на жидкой завалке обеспечивают оптимальные технико-экономические показатели. К. п. д. печей достигает 90—95%; занимаемая площадь и стоимость установки значительно меньше, чем тигельных печей. Расход электроэнергии для поддержания температуры чугуна порядка 1400° С составляет примерно 20 кВт·ч/т. Для расплавления твердой шихты такие печи, как правило,, не используют.

Задание на самостоятельную работу

Ознакомится с ДСТУ 3132-95 «Литейный чугун» и с ДСТУ 3133-95 «Передельный чугун».

Вопросы для самоконтроля

1. Огнеупорные материалы. Классификация, назначение.
2. Первичные материалы. Классификация, назначение.
3. Легирующие, рафинирующие и модифицирующие добавки.
4. Топливо. Флюсы.
5. Расчет шихты для выплавки чугуна аналитическим методом, методом подбора.
6. Методика расчета шихты.

Тема 2.2 Теория и технология выплавки чугуна.

Методические указания

При изучении этой темы следует уделить особое внимание конструкции печей, принципам их работы, особенностям технологических процессов выплавки чугуна.

Лекция 7 Теория и технология выплавки чугуна дуплекс процессом

- 1. Физико-химическая характеристика полипроцессов.**
- 2. Технология плавки дуплекс-процессами.**

Литература: [2], 325-334; [4], 204-209, 218-226; [5], 100-155.

В последнее время широкое распространение получил дуплекс-процесс, при котором плавильные агрегаты применяются в следующих сочетаниях: вагранка — дуговая электропечь (производство ковкого и магниевого чугунов, а также серого высоких марок); вагранка—индукционная тигельная печь (производство серого и ковкого чугунов); вагранка — индукционная канальная печь (производство серого чугуна); дуговая — индукционная тигельная печь (производство ковкого и магниевого чугунов); индукционная тигельная — дуговая электропечь (производство ковкого и магниевого чугунов); индукционная тигельная — индукционная канальная печь (производство серого чугуна высоких марок). В этих печах выплавляются все марки чугунов для индивидуального и массового производства отливок. Последний агрегат служит для перегрева и доводки чугуна по химическому составу или выполняет функции миксера.

Физико-химическая характеристика полипроцессов.

Все процессы, протекающие в первичных агрегатах (В, ДП, ИТП), идентичны рассмотренным выше для соответствующих методов плавки монопроцессами. Изменение химического состава чугуна во вторичных агрегатах (ДП, ИТП, ИКП) связано с взаимодействием жидкого металла со шлаком и футеровкой печн.

Дуплекс-процессы могут осуществляться с весьма значительным изменением химического состава чугуна и даже с добавкой твердых шихтовых материалов (например, возврата и других отходов при плавке высокопрочного чугуна ВЧ). Такие процессы происходят только в ДП и ИТП. В этом случае процесс плавки следует рассматривать как аналогичный

монопроцесс (в ДП или ИТП) с частичной заменой твердой шихты жидкой садкой, которая при индукционной плавке характерна и для монопроцесса (зумпф).

При дуплекс-процессе без введения шихты и других добавок изменение химического состава связано с угаром или пригаром элементов и заливкой или отбором порций металла. Выпуск порции металла изменяет содержание элемента, но не изменяет концентрацию элемента, поэтому нужно рассматривать влияние на концентрацию элемента входящих порций металла.

Поскольку заливка порции металла и их выпуск могут чередоваться хаотично, представить общую модель в виде формулы затруднительно. Поэтому целесообразно, используя ЭВМ, составить алгоритм миксирования.

Технология плавки дуплекс-процессами.

Первым дуплекс-процессом был В—ДП, который еще много десятилетий назад начали применять для выплавки КЧ. Технология плавки этим дуплекс-процессом заключается в том, что в подготовленную дуговую печь за 1—2,5 ч до начала разливки заливают жидкий чугун из вагранки. При использовании отходов (что практикуется при производстве ВЧ) их загружают на подину печи до слива в печь ваграночного чугуна. После заливки чугуна в дуговую печь процесс ведется аналогично монопроцессу в период доводки. В дуговых печах происходит значительное изменение химического состава чугуна, и его необходимо корректировать по результатам экспресс-анализа в соответствии с рекомендациями табл. 10.3. Значительно меньшим изменениям подвержен химический состав чугуна при использовании канальных печей.

Дуплекс-процесс В—ИКП широко распространен в мировой практике. В нашей стране он внедрен на ЗИЛе, ГАЗе и других заводах.

Обычно в канальной печи не доводят чугун до заданного состава, а используют ее только для усреднения состава и подогрева жидкого чугуна. Присадки при необходимости вводят в передаточные ковши или на желоб. Для обеспечения усреднения чугуна по составу и температуре в канальной печи необходимо постоянно поддерживать количество чугуна не менее 2/3 всего ее объема.

Дуплекс-процесс В—ИТП также широко распространен в литейных цехах машиностроительных заводов.

Применение индукционных тигельных печей в качестве вторичного агрегата целесообразно в тех случаях, когда в течение смены необходимо получать несколько марок чугуна, так как в этих печах легче корректировать состав чугуна присадками ферросплавов, карбюризаторов или стальных отходов.

Дуплекс-процесс ИТП — ИКЛ характерен тем, что чугун может быть получен из шихты на базе мелкого стального лома и отходов в результате

использования *технологических преимуществ индукционных тигельных печей по сравнению с вагранками*. На ВАЗе применяют дуплекс-процесс ИТП—ИКЛ при производстве серого чугуна. Установлены индукционные тигельные печи с массой садки 25 т и канальная печь с массой садки 45 т. В качестве шихты применяют отходы кузнечно-штамповочного производства, возврат и небольшое количество литейного чугуна. Металл из одной печи в другую передается по желобу. Средний химический состав шихты (в %): 2,179 С, 2,078 Si, 0,624 Mn, 0,05 S, 0,058 O, 0,184 Cr, 0,035 Sn, 0,0183 Ni, 0,089 Cu. Плавка идет приблизительно 3 ч. Масса всей садки около 26 т. Через 3 ч 25 мин после загрузки 20 т металла переливают в канальную печь. Состав этого чугуна (в %): 3,35 С, 1,97 Si, 0,61 Mn, 0,045 S, 0,05 P, 0,15 Cr, 0,038 Sn, 0,29 Ni. Шлак плавки содержит 30—42 % Fe_2O_3 , 45—53% SiO_2 , 4,5—5,2 % MnO. В канальной печи химический состав чугуна (в %) изменяется незначительно: С от 3,325 до 3,33, Si от 1,935 до 1,90, Mn от 0,595 до 0,59. Перед заливкой 20 т металла из тигельной печи в канальной печи имеется остаток жидкого металла около 20 т.

Дуплекс-процесс ДП—ИТП также применяют на ВАЗе, где установлены дуговые печи с массой садки 40 т, в которых расплавляется твердая шихта, а в индукционных тигельных печах металл доводят до необходимого состава и выдерживают в процессе заливки форм. Для выплавки СЧ, КЧ, ВЧ используются шихты, содержащие в основном стальные отходы и возврат, а также до 11 % чушкового чугуна (для СЧ) и различных добавок (ФС, ФМн, графит).

Для более полного усвоения графита и компенсации тепловых потерь при переливе в тигельную печь металл перегревается на 50°C выше температур, при которых он выдается из печи в заливочные ковши. Температура перегрева колеблется в диапазоне 1520—1580°C.

Корректировка химического состава по Кремнию и марганцу производится в дуговой печи, по углероду — вводом графита в металлоприемник переливного желоба при выдаче металла в индукционную печь.

Дуплекс-процесс ИТП—ДП применяют в случае необходимости глубокой десульфурации чугуна. На ГАЗе этот процесс используют при производстве коленчатых валов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

На практике встречаются и другие сочетания плавильных агрегатов применительно к условиям конкретного производства. *Особенно перспективно использование дуплекс-процесса доменная печь — электропечь. В этом случае энергетические затраты минимальны [15].*

Лекция 8 Теория и технология внепечной обработки чугуна

1. Десульфурация чугуна
2. Электрошлаковая обработка жидкого чугуна
3. Продувка чугуна газами
4. Применение физических методов воздействия

Литература: [2], 337-349; [4], 226-228, 233-253; [5], 169-173, 187-204; [6], 53-91.

Внепечные методы обработки чугуна широко используют для изменения в нужном направлении жидкого состояния, структуры и свойств чугуна в отливках.

С этой целью в чугун после его выпуска из плавильного агрегата вводят различные добавки, которые взаимодействуют с расплавом. Изменяя состав и количество присадок, можно в широких пределах регулировать структуру и свойства чугуна. Эти добавки можно вводить в чугун на желобе плавильного агрегата, в разливочном ковше, в специальных устройствах. Температура жидкого чугуна должна составлять менее 1450°C, поскольку за время внепечной обработки она понижается на 40—80°C. Ввод добавок в жидкий чугун производится при заполнении ковша на 0,15—0,20 его вместимости, чтобы они перемешивались струей металла и равномерно распределялись во всей массе чугуна. Для лучшего растворения добавки размельчают на куски размером от 0,5 до 10 мм в зависимости от температуры и массы обрабатываемого чугуна.

Для повышения эффективности внепечной обработки иногда применяют дополнительное перемешивание (механическое, электромагнитное, вибрационное, барботацией), которое должно быть кратковременным и интенсивным во избежание чрезмерного охлаждения металла.

Расход добавок колеблется в пределах 0,05—4,0 % массы обрабатываемого чугуна. Шлак, образующийся в результате внепечной обработки, необходимо удалять.

Разливку обработанного металла в литейные формы производят через 2—3 мин после введения добавки, а заканчивают через 10—15 мин в зависимости от массы, вида, марки чугуна и других факторов.

Ковшовые добавки используют для раскисления, десульфурации, модифицирования и микролегирования жидкого чугуна.

Следует отметить, что указанные процессы протекают обычно совместно и чаще всего одновременно, т. е. они взаимосвязаны. Этому способствуют благоприятные кинетические условия протекания реакций (высокая температура, достаточное значение энергии активации, энергичное перемешивание жидкого металла) и столь же благоприятные термодинамические условия (высокая степень химического сродства, большие отрицательные значения свободной энергии реакций взаимодействия).

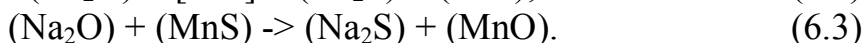
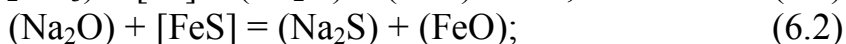
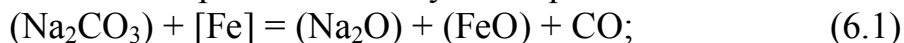
Введение в жидкий металл различных присадок вызывает появление сил химической связи между катионами электроположительных элементов и анионами кислорода, серы, азота, водорода и углерода, растворенных в металле. В результате химического взаимодействия присадок с примесями чугуна (и стали) образуются оксиды, сульфиды, нитриды и карбиды.

Десульфурация чугуна

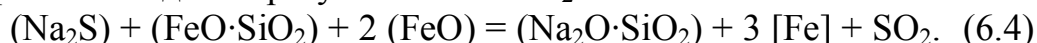
Десульфурацию чугуна осуществляют с помощью соды, извести, карбида кальция, а также магния и его сплавов.

Обработка чугуна **содой** издавна применяется на металлургических и машиностроительных заводах. Использование соды обусловливается, в основном, следующими факторами: при высоких температурах карбонат натрия разлагается, образующийся оксид натрия имеет высокое химическое сродство к сере; благодаря низкой температуре плавления сода в контакте с чугуном расплавляется, становится более реакционно-способной; выделяющиеся при этом газы способствуют перемешиванию металла со шлаком; стоимость соды относительно невысока. Сода плавится при температуре 852°C и затем восстанавливается до металлического натрия, температура плавления которого 80°C. Десульфурация содой практически заканчивается в тот момент, когда начинается интенсивное образование дыма в результате восстановления натрия и сгорания его в атмосфере. Относительное количество испаряющегося натрия зависит от температуры жидкого чугуна. Установлено, что десульфурация содой происходит тем лучше, чем ниже температура чугуна.

При десульфурации содой протекают следующие реакции:

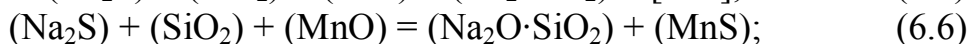
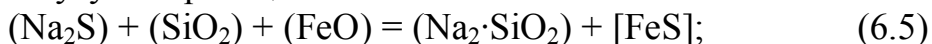


При обработке содой образуется также SO_2 :



Образующиеся газы (CO и SO_2) барботируют чугун, что облегчает очистку его от газов и неметаллических включений.

Шлак образуется очень жидкий. С целью загустения шлака металл присыпают сверху песком, в противном случае сера может из шлака переходить обратно в чугун по реакциям:



Кремнезем, содержащийся в шлаке, снижает эффективность обработки:

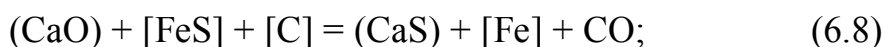


Поэтому при десульфурации содой следует избегать образования кислого шлака, а также применения ковшей с кислой футеровкой. Процесс десульфурации сопровождается снижением температуры чугуна на 40—50°C и содержания кремния, а иногда и углерода. Расход соды на обработку

чугуна зависит от содержания серы в чугуне и составляет 5—8 кг на 1 т жидкого металла, при этом степень использования соды на связывание и удаление серы не превышает 15 %.

Наряду с положительными сторонами использование соды для десульфурации имеет ряд существенных недостатков, а именно: глубина рафинирования ограничивается примерно 0,02 % S; при обработке чугуна содой в ковше или на желобе выделяется большое количество вредных газов и пыли, что загрязняет окружающую среду и ухудшает Условия труда; срок службы футеровки ковшей снижается вследствие взаимодействия содового шлака с футеровкой ковша, коэффициент Использования Na_2CO_3 низок, стабильность процесса недостаточна.

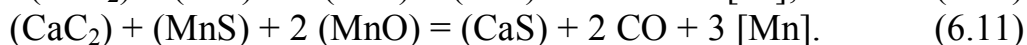
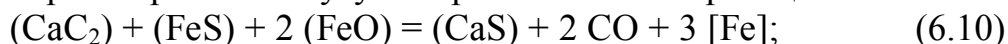
Известь относится к традиционным реагентам, применяемым для обработки чугуна. При десульфурации известью протекают следующие реакции:



Эти реакции являются эндотермическими и также приводят к снижению температуры чугуна. Для десульфурации необходимо обеспечить достаточный контакт между известью и чугуном. Известно несколько способов ввода тонкоизмельченной извести, обеспечивающих лучший контакт ее твердых частиц с расплавом, а также наиболее благоприятные термодинамические условия для протекания реакции взаимодействия с компонентами чугуна. Например, чугун перемешивают с известью во вращающихся ковшах или механическими мешалками, или продувкой ванны газом. В качестве газа-носителя применяют как сжатый воздух, так и природный газ—азот.

Используют также смесь извести с содой (около 20%) или с плавленым шпатом (10 %). Расход извести составляет 6—12 кг на 1 т чугуна. Коэффициент использования десульфуратора на связывание и удаление серы не превышает 4—8 %.

Карбид кальция имеет высокое химическое сродство к сере. Его взаимодействие с растворенной в чугуне серой описывают реакциями:



При введении карбида кальция в чугун может переходить углерода



При десульфурации карбидом кальция снижение температуры чугуна незначительно. Наблюдается выделение газов и небольшие изменения содержания углерода и кремния. Равновесное содержание серы при температурах жидкого чугуна чрезвычайно низкое ($1,6 \cdot 10^{-7}$ % при 1250°C). Следовательно, имеются благоприятные термодинамические условия для протекания реакций между растворенной в чугуне серой и карбидом кальция. Однако кинетические условия взаимодействия твердых частиц карбида кальция с серой зависят от многих факторов и в первую очередь от

обеспечения достаточно развитой поверхности контакта. Известно, что реакция с серой может протекать только на поверхности частиц карбида кальция, диффузия же серы в глубь твердой частицы — медленный процесс.

Полученный шлак является твердым и хрупким, легко удаляется с поверхности чугуна и не реагирует с футеровкой ковшей. Однако требуется повышенная температура чугуна (до 1500°C), интенсивное перемешивание жидкого металла и тщательное измельчение карбида кальция. С увеличением продолжительности перемешивания и уменьшением размера частиц CaC_2 повышается степень десульфурации.

Для ввода в чугун карбида кальция применяют инжектирование в струе сжатого газа или загрузку порошка на поверхность металла с последующим перемешиванием. Возможно использование карбида кальция для десульфурации в индукционных электропечах промышленной частоты, где имеется сильное электромагнитное перемешивание. Удельный расход карбида кальция различен; он зависит от содержания серы, способа ввода, средств перемешивания и качества реагента. Диаграмма для определения расхода карбида кальция при десульфурации в индукционных электропечах приведена на рис. 6.1.

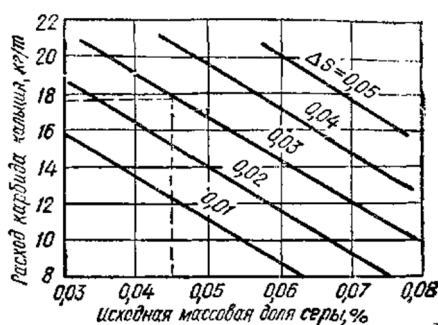
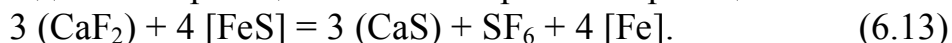


Рис. 6.1. Расход карбида кальция для рафинирования чугуна при различном содержании серы (по данным О. В. Пузырькова-Уварова)

Карбид кальция (в отличие от извести и соды) дает возможность глубокой десульфурации чугуна.

К недостаткам процесса относятся загрязнение окружающей среды ацетиленом, выделяющимся при взаимодействии ковшовых шлаков с влагой, значительное количество образующихся шлаков и большие потери металла с ними. Кроме того, литейный карбид кальция выпускается в ограниченном объеме.

Помимо указанных материалов для десульфурации чугуна применяют иногда брикеты, состоящие из Na_2CO_3 , CaF_2 , CaC_2 , CaO . В этом случае наряду с ранее приведенными реакциями может протекать реакция



Степень десульфурации этими реагентами тем выше, чем больше контактная поверхность между реагентами и металлом, т. е. чем меньше частицы реагента, тем интенсивнее его перемешивание с металлом.

Электрошлаковая обработка жидкого чугуна

Обработку жидкого чугуна шлаком осуществляют в специальных установках с целью удаления фосфора для дополнительного перегрева, а также для электрошлакового переплава чугуна. Схемы электрошлаковых печей для обработки чугуна приведены на рис. 6.3.

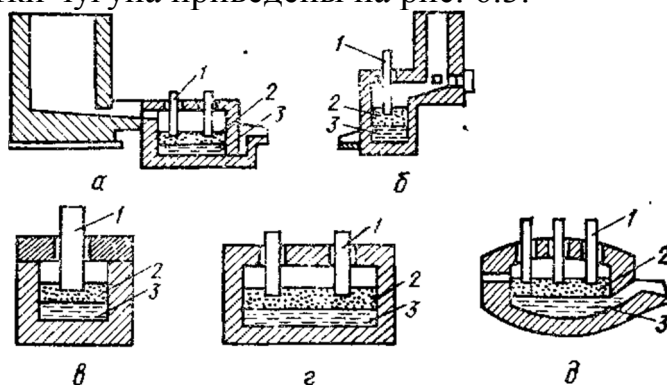


Рис. 6.3. Схемы электрошлаковой обработки чугуна:
а, б — в копильнике; в — однофазная печь; г — бифилярная печь
д — трехфазная электрошлаковая печь

Во всех установках имеются токоподводящие электроды 1, находящиеся в контакте со шлаковой ванной 2, расположенной над расплавленным металлом 3. Электрический ток проходит через шлак, разогревает его до 1700—1800 °С и перегревает металл до высоких температур (1500—1550 °С).

Расход электроэнергии для перегрева чугуна на 100°С составляет около 50—60 кВт ч/т ($18 \cdot 10^7$ Дж/т). По расходу энергии электрошлаковые печи подобны в данном случае электродуговым печам, поскольку тепловые потери от металла к своду и в окружающую среду меньше благодаря защите поверхности металла шлаком.

Перегретый шлак представляет собой активную металлургическую фазу, которая в зависимости от состава и физических свойств взаимодействует с металлом, т. е. либо удаляет из него те или иные элементы, либо, наоборот, переводит их из шлака в металл. Обычно применяют стандартные флюсы АНФ-6, АНФ-9, АНФ-29, смеси из извести, известняка, плавикового шпата, боя, высокоглиноземистых огнеупоров и графита с различным сочетанием составляющих. Шлаки содержат 10—60 % CaO; 20—80 % CaF₂; 10—55 % Al₂O₃; 6—40 % SiO₂; 6—20 % MgO; 10—40 % MnO; 2—30 % FeO; 10—20 % С. Электропроводимость шлака должна составлять 200—400 Ом м.

При электрошлаковой обработке чугуна можно существенно уменьшить содержание серы и фосфора (на 60—95 %), неметаллических включений (на 40—55 %) и газов (на 20—50 %), производить науглероживание чугуна и восстановление из шлака кремния и марганца.

Иногда применяют обработку чугуна синтетическими шлаками в ковше или в тигле плавильной печи, однако результаты получаются хуже, чем при электрошлаковой обработке, поскольку шлак перегревается недостаточно.

Вопросы для самоконтроля

1. Устройство, принцип действия коксовой вагранки. Процессы, протекающие в различных зонах вагранки.
2. Технология выплавки чугуна в дуговых электропечах. Основные физико-химические процессы, протекающие в печи.
3. Технология выплавки чугуна в индукционной тигельной печи. Основные физико-химические процессы, протекающие в печи.
4. Технология выплавки чугуна в пламенных печах. Основные физико-химические процессы, протекающие в печи.
5. Выплавка чугуна дуплекс-процессом. Особенности процесса. Основные физико-химические процессы, протекающие в печи. Преимущества и недостатки данного способа получения жидкого чугуна.
6. Особенности процесса модифицирования серого чугуна.
7. Особенности процесса модифицирования при получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.
8. Особенности процесса модифицирования при получении высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом.
9. Технологические особенности процесса легирования при получении легированных чугунов.
10. Вакуумная и аргонно-кислородная обработка жидкого чугуна.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воздвиженский, В.М.** Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении / В.М. Воздвиженский, А.В.Грачев, В.В. Спасский – М.: Машиностроение, 1984. – 431 с.
2. **Ланда, А.Ф.** Основы получения чугуна повышенного качества. – М.: ГНТИМЛ, 1960. – 240 с.
3. **Леви, Л.И.**– Литейные сплавы / Л.И. Леви, С.К. Кантенник – М.: Высшая школа, 1967. – 435 с.
4. **Гиршович, Н.Г.** Справочник по чугуному литью. / Н.Г. Гиршович. – Л.: Машиностроение, 1978. –758 с.
5. **Ващенко, К.И.** Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок / К.И. Ващенко, В.С. Шумихин. – К.: Вища школа, 1992. – 246 с.
6. **Захарченко, Э.В.** Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко, Ю.Н. Левченко, В.Г. Горенко, П.А. Вареник. – К. Наукова думка, 1986. – 248 с.
7. **Кудрин, В.А.** Внепечная обработка чугуна и стали / В.А. Кудрин. – Учебник для ВУЗов. – М.: Металлургия, 1992. – 336 с.
8. **Сухарчук, Ю.С.** Плавка чугуна в вагранках / Ю.С. Сухарчук, А.К. Юдкин. –М. – Машиностроение, 1981. – 143 с.
9. **Худокормов, Д.Н.** Производство отливок из чугуна / Д.Н. Худокормов. – Минск: Высшейшая школа, 1987. – 200 с.
10. **Долотов, Г.П.** Печи и сушила литейного производства / Г. П. Долотов, Е. А. Кондаков. – М. Машиностроение, 1990. – 302 с.