

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Е.В. Братковский, А.В. Заводяный

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Учебное пособие

Новотроицк 2016

УДК 621.74 (075.8)

Рецензенты:

*Доцент кафедры электроэнергетики и теплоэнергетики
Орского гуманитарно-технологического института (филиал) ОГУ
О.С. Ануфриенко, канд. техн. наук.*

*Старший преподаватель кафедры Metallургических технологий и оборудования
Новотроицкого филиала НИТУ «МИСиС»
Е.А. Шевченко, к.т.н.*

Братковский Е.В., Заводяный А.В. Учебное пособие по дисциплине «Литейное производство» для подготовки бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия». – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2016. – 140 с.

В учебном пособии представлены основные сведения по дисциплине «Литейное производство»:

- классификация способов литья, видов расплавов и их литейные свойства, литниково-питающие системы (с методикой их расчета).

- производство отливок из чугунов и сталей, выплавка чугунов и сталей в современных литейных цехах, включая основные методы рафинирования, модифицирования и доводки металлов.

- исходные материалы и технология приготовления формовочных и стержневых смесей, а также основные методы изготовления разовых песчано-глинистых форм;

- специальные способы литья: кокильное, оболочковое, центробежное, литьё под давлением и выплавляемым моделям;

Основной материал данного пособия излагается преподавателем на лекциях, а некоторые разделы, которые указывает преподаватель, студенты должны изучать самостоятельно. Материал учебного пособия подготовлен на основе трудов ведущих специалистов в области литейного производства. Пособие составлено в соответствии с требованиями ФГОС ВО подготовки бакалавров направления 22.03.02 «Металлургия».

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический уни-
верситет «МИСиС», 2016

Содержание

Введение	5
Список сокращений	6
Глава 1. История развития литейного производства. Классификация методов литья	7
1.1 История развития литейного производства	7
1.2 Классификация методов литья	9
Глава 2. Литейные свойства расплавов. Литниково-питающие системы	11
2.1 Литейные свойства расплавов	11
2.2 Литниково-питающие системы	16
Глава 3. Чугунное литьё	20
3.1 Общие сведения по железоуглеродистым сплавам	20
3.2 Классификация чугунов	22
3.3 Основные преимущества чугунных отливок	23
3.4 Физические и эксплуатационные свойства чугунов	24
3.5 Кристаллизация и структурообразование чугуна	25
3.6 Влияние различных факторов на структуру и свойства чугунов	27
3.7 Влияние металлической матрицы и структуры чугуна на механические свойства отливки	32
Глава 4. Получение отливок из различных видов чугуна	36
4.1 Отливки из серых чугунов	36
4.2 Отливки из отбеленного чугуна	39
4.3 Отливки из ковкого чугуна	42
4.4 Отливки из высокопрочного чугуна	46
4.5 Чугун с вермикулярным графитом	50
4.6 Термическая обработка чугунных и стальных отливок	51
Глава 5. Стальное литьё	54
5.1 Углеродистые стали	54
5.2 Легированные конструкционные литейные стали	59
5.3 Высоколегированные литейные стали со специальными свойствами	62
Контрольные вопросы для самопроверки	66
Глава 6. Выплавка чугуна в литейных цехах	67
6.1 Выплавка чугуна	67
6.2 Технологические схемы плавильных печей	67
6.3 Общая характеристика процесса плавки чугуна	68
6.4 Плавка чугуна в вагранках	69
6.5 Технология плавки чугуна в вагранке	72
6.6 Интенсификация плавки чугуна в вагранках	74
6.7 Плавка чугуна в газовых вагранках	75
6.8 Плавка чугуна в дуговых печах	76
6.9 Технология плавки чугуна монопроцессом в дуговой печи	77
6.10 Плавка чугуна в индукционных печах	78
Глава 7. Выплавка стали в литейных цехах	82
7.1 Классификация способов производства стали	82
7.2 Общая характеристика процесса плавки стали	83
7.3 Плавка стали в мартеновской печи	87
7.4 Выплавка стали в конвертере	89
7.5 Плавка стали в дуговых печах	90

7.6 Плавка стали в индукционных печах	95
7.7 Технология получения высококачественной стали для отливок.....	95
Глава. Изготовление отливок в разовых песчаных формах	100
8.1 Основные этапы производства отливок.....	100
8.2 Формовочные материалы	102
8.3 Приготовление формовочных и стержневых смесей	111
8.4 Противопригарные покрытия	114
8.5 Модели и модельные плиты	115
8.6 Стержневые ящики	119
8.7 опоки.....	121
8.8 Изготовление форм и стержней	122
Глава 9 Специальные виды литья	130
9.1 Изготовление отливок литьем по выплавляемым моделям	130
9.2 Изготовление отливок литьем по выжигаемым моделям	131
9.3 Изготовление отливок литьем в оболочковые формы	132
9.4 Изготовление отливок в металлических формах.....	133
9.5 Изготовление отливок литьем под давлением.....	135
9.6 Изготовление отливок центробежным литьем	137
Библиографический список.....	139

Введение

Литейное производство является одной из важнейших отраслей машиностроительной промышленности. В конструкциях современных машин и приборов большая часть деталей представляет собой отливки из стали, чугуна, медных, алюминиевых, магниевых и других сплавов. Литые детали составляют 60-80% общего веса машин. Особенно большое место занимают отливки в конструкциях металлургического оборудования, станков, турбин, кузнечно-прессовых машин. Методом литья можно из любых металлов и их сплавов изготавливать изделия сложной конфигурации, большинство из которых невозможно получить другими производственными процессами (например, штамповкой, механической обработкой). Масса отливок может быть самой различной – от нескольких граммов до сотен тонн. Стоимость литой заготовки или детали, как правило, получается меньше изготовленной другими методами. Отливка может представлять собой вполне законченную деталь или заготовку, которая подвергается затем обработке на металлорежущих станках.

По мере совершенствования литейной технологии и улучшения структуры литого металла увеличивается прочность получаемых отливок, их точность и чистота поверхности. В результате отливки по конфигурации и размерам все больше приближаются к окончательным деталям и требуют значительно меньшей механической обработки.

Повышение механических свойств литых деталей позволяет в настоящее время получать путем литья такие ответственные детали, как коленчатые валы двигателей, рамные крепления локомотивов, детали автомашин, лопатки турбин, зубчатые колеса редукторов и др. В результате совершенствования современных методов литья отливки из новых труднообрабатываемых сплавов находят применение в ракетостроении, радиоэлектронике, приборостроении, авиации и других отраслях. Дальнейшее развитие химического машиностроения также требует расширения производства отливок из жаропрочных и стойких против коррозии сплавов.

Все это характеризует значение литейного производства в народном хозяйстве. Поэтому совершенствованию технологии и оборудования литейного производства является важной и актуальной задачей.

В настоящем пособии приведены основные сведения по физическим и эксплуатационным свойствам отливок, свойствам расплавов, структуре чугунов и сталей, термодинамическим основам графитизации, различным технологическим операциям получения качественных отливок. Даются также характеристики важнейших материалов и устройств, применяемых как для получения литейных форм, так и для выплавки необходимых литейных сплавов.

Список сокращений

А – аустенит;
АРУ – автоматическое разливочное устройство;
Б – бейнит;
БЧ – белый чугун;
В – вагранка;
ВЧШГ – высокопрочный чугун с шаровидным графитом;
Г – графит;
ДСП – дуговая сталеплавильная печь;
ИКП – индукционная канальная печь;
ИТП – индукционная тигельная печь;
КИМ – коэффициент использования металла;
КЧ – ковкий чугун;
Л – ледебурит;
ЛВМ – литье по выплавляемым моделям;
ЛПД – литье под давлением;
ЛПС – литниково-питающая система;
М – мартенсит;
П – перлит;
ПБКЧ – перлитный белосердечный ковкий чугун;
ПБЧ – перлитный белый чугун;
СЧПГ – серый чугун с пластинчатым графитом;
Ф – феррит;
ФЧКЧ – ферритный черносердечный ковкий чугун;
Ц – цементит;
ЧВГ – чугун с вермикулярным графитом.

Глава 1. История развития литейного производства. Классификация методов литья

1.1 История развития литейного производства

История развития литейного производства неразрывно связана с этапами развития материальной культуры человеческого общества. Изменение в видах используемых человеком материалов отражалось на технических решениях, принимаемых при изготовлении из этих материалов литых изделий.

В Южной Туркмении литье знали за 5000 лет до н.э. Сначала для литья использовалась самородная медь, однако она отличалась плохой жидкотекучестью, сравнительно высокой температурой плавления, поэтому литье получило мощный толчок к развитию, когда стали применять сплавы, имеющие по сравнению с чистыми металлами лучшие литейными свойства.

Первым действительно литейным сплавом была мышьяковистая бронза. В Грузии имелись большие запасы мышьяковистых руд, бронзу или выплавляли из полиметаллических руд или при плавке медных руд добавляли мышьяковистые материалы. Лишь со 2 тысячелетия до н.э. вместо мышьяковистых бронз начали применять оловянные. Первые литейные формы изготавливали из камня мягких пород, из глинистой пасты (сушили и обжигали), песчано-глинистыми. В качестве моделей применялись ранее изготовленные из камня изделия, о чем свидетельствует, например, идентичность формы каменных и литых топоров, или специальные деревянные модели. Сначала формы были открытыми, затем их стали накрывать сверху камнем - односторонние закрытые формы, одноместные и многоместные. В 3 тысячелетии до н.э. появились стержни (из глины), двухсторонние формы, состоящие из двух или больше частей. Для отвода газов из форм стали применять глину с навозом, соломой, шерстью и другими выгорающими добавками для обеспечения газопроницаемости.

С течением времени технология литья все более совершенствовалась, количество литых изделий увеличивалось. В первую очередь это были изделия художественного литья (серпы, оружие, предметы роскоши и украшения, предметы религиозного назначения, с IX века до н.э. начинается литье колоколов). Нередко изготавливались биметаллические отливки, появились литые монеты. В 3 тысячелетии до н.э. на Кавказе возникло литье по выплавляемым моделям, давшее мощный толчок развитию художественного литья. Пустотелые отливки получали либо за счет использования стержней, либо за счет выливания незатвердевшего металла. Самая крупная отливка была получена в VIII веке н.э. в Японии - это статуя Будды массой свыше 250 тонн для храма Тодайдзи.

В 1 тысячелетии до н.э. на Северном Кавказе для производства наконечников стрел применяли многоместные металлические формы (кокили). Для отливки украшений литейщики Киевской Руси применяли бронзы, биллон, сплавы серебра с оловом, олово. Для литья олова применяли бронзовые формы.

Китайцы использовали железные руды с высоким содержанием фосфора (5-7%), что значительно снижало температуру плавления металла и положило начало применению чугуна. В Китае чугун начал использоваться еще в VI веке до н.э., на Руси - в XI-XIV веках, когда проявились первые шахтные печи для плавки и восстановления железа из руд - домницы.

В XIV веке в Московском государстве начинает развиваться литье бронзовых пушек и ядер. В 1478 году в Москве была основана «Пушечная изба», в 1648 году - первый русский оружейный завод «Ствольная мельница». В 1554 году в Москве была отлита

первая пушка из чугуна. Настоящими шедеврами мастерства литейщиков стали «Царь-пушка» (1585 г.) массой 39 т, длиной 5,34 м, «Царь-колокол» (1733-1735 гг.) массой 202 тонн, высотой 6,14 м, диаметром 6,6 м.

Выдающимися произведения искусства являются памятники А.В. Суворову, М.И. Кутузову, Барклаю де Толли, скульптуры коней на Аничковом мосту (П.К. Клодт, 1830 г.), памятник К. Минину и Д. Пожарскому (скульптор И.П. Мартос, литейщик В.П.Екимов, 1816 г.) в Москве, памятник «Тысячелетие России» в Новгороде (скульптор М.О. Микешин, 1862г.), «Медный всадник» (Э.М. Фальконе, 1782г.).

Чугун широко используется и как наиболее распространенный конструкционный материал в машиностроении и в качестве материала для художественного литья. В 1800 году Россия заняла первое место в мире по выплавке чугуна. Самая крупная чугунная отливка массой 650 тонн (шабот) была изготовлена в Перми (1873г.), для чего построили специальный литейный цех с 14 вагранками, отливка остывала в форме около 5 месяцев.

На Каслинском заводе, который и сейчас отливает уникальные произведения искусства, в 1900 году был изготовлен чугунный павильон для Всемирной выставки в Париже. Многочисленные узорные ограды в Санкт-Петербурге – в большинстве своем литейные чугунные.

Опыт показывает, что все металлургические специальности между собой тесно связаны, и инженеры-металлурги должны быть готовы, даже если они не профессиональные литейщики, к работе в литейном производстве металлургического или машиностроительного предприятия или к необходимости контроля работы литейщиков в качестве потребителя продукции литейного производства. Поэтому знание сущности технологического процесса получения отливки для специалиста - металлурга является необходимым, а в ряде случаев и обязательным, условием успешной профессиональной деятельности. Это в значительной степени относится и к специалистам различных машиностроительных специальностей.

В процессе развития литейное производство прошло 3 этапа:

- когда производство литья являлось ремеслом, а отливки представляли собой жизненно необходимые предметы быта;
- изготовление художественных отливок, многие из которых являлись произведением искусства;
- изготовление отливок разного назначения, что потребовало выявления закономерностей процесса формирования отливки, разработки научных основ литейного производства.

Самостоятельной научной дисциплиной теория литейных процессов стала в середине 50-х годов XX века. Современная теория литейных процессов включает четыре основных раздела:

- теория плавки и обработки литейных сплавов в жидком состоянии;
- теория формирования отливки, т.е. формирования структуры и свойств отливки в процессе заливки, затвердевания и охлаждения металла в форме;
- теория литейной формы;
- теория обработки литейных сплавов в твердом состоянии, учитывающая специфику термической, пластической и других видов обработок литейных сплавов.

1.2 Классификация методов литья

Все отливки классифицируются следующим образом: по виду заливаемого сплава, по способу изготовления литейной формы.

I. По виду заливаемого сплава.

1. чугунное литье;
2. стальное литье;
3. цветное литье.
 - 3.1. сплавы на основе меди;
 - 3.2. сплавы на основе алюминия;
 - 3.3. сплавы на основе Zn, Ni, Cu, Ti, Mg, Mo и др.
4. благородные металлы;
5. шлаковое литье.

II. По способу изготовления литейной формы.

1. разовые формы:
 - 1.1. песчано-глинистые формы;
 - 1.2. оболочковые формы;
 - 1.3. керамические формы;
 - 1.4. литье по выплавляемым моделям;
 - 1.5. литье по выжигаемым моделям;
2. постоянные формы (кокили):
 - 2.1. литье под давлением;
 - 2.2. центробежное литье.
3. Полупостоянные формы – облицованные кокили.

Заготовки, используемые в машиностроении делятся на следующие виды: поковки, штамповки, отливки.

Отливки по сравнению с поковками и штамповками имеют следующие преимущества.

1. Возможность получения любой, даже самой сложной конфигурации.
2. Большой диапазон масс отливок – от нескольких грамм до сотен тонн, при толщине стенки от 1 мм до 1м.
3. Минимальные отходы при производстве, т.е. максимальный коэффициент использования металла (КИМ):

$$\text{КИМ} = \frac{\text{масса готового изделия}}{\text{масса заготовки}}.$$

Поэтому КИМ всегда меньше 1 и составляет для различных заготовок: поковок 0,48, штамповок – 0,615, отливок – 0,805.

3. Возможность изготовления изделий из сплавов, не поддающихся механической обработке (износостойкие чугуны, стали, специальные сплавы, шлаковое литье).

4. Многие типы отливок эксплуатируют без механической обработки (рабочие органы размалывающего оборудования, гусеничные траки, шлаковни, поддоны, печная арматура и т.д.).

Во многих машинах и механизмах масса литых заготовок составляет до 90% (детали двигателей внутреннего сгорания, запорная арматура, турбины).

Сущность литейного производства заключается в плавке металла, изготовлении форм, заливке металла и охлаждении, выбивке, очистке, обрубке отливок, термической

обработке и контроле качества отливок. Трудоемкость этих процессов распределяется приблизительно следующим образом: изготовление форм – 60%; плавка и заливка металла – 10%, обработка (выбивка, обрубка, термическая обработка) отливок – 30%.

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Какие преимущества литых заготовок перед кованными и штампованными?
- 2 Перечислите основные исторические этапы развития литейного производства.
- 3 Дайте характеристику основным видам литья.
- 4 Что такое коэффициент использования металла?
- 5 Как классифицируются виды литья?

Глава 2. Литейные свойства расплавов. Литниково-питающие системы

2.1 Литейные свойства расплавов

Получение качественных отливок в основном зависит от свойств металла в жидком состоянии, при переходе в твердое состояние (ликвидус-солидус) и при охлаждении в литейной форме.

В настоящее время принята следующая классификация литейных свойств.

1. Жидкотекучесть – заполнение сплавом формы и четкость её отпечатков в области жидкого и жидко-твердого состояния.
 2. Усадка – объемная в области жидкого и жидко-твердого состояний; при фазовых изменениях; объемная и линейная в области твердо-жидкого и твердого состояний.
 3. Степень поражения усадочными раковинами и усадочной пористостью.
 4. Степень поражения неметаллическими включениями (состав, количество, форма и расположение в отливке; образование в зависимости от состава сплава и разливки).
 5. Склонность к газопоглощению и пленообразованию.
 6. Состояние первичной и вторичной кристаллизации, зависит от химического состава, процесса плавки, разливки, раскисления, модифицирования, скорости охлаждения (вид кривой затвердевания, структурной диаграммы).
 7. Склонность к ликвации. Ликвация - неоднородность сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, образуется при кристаллизации слитка, непрерывнолитой заготовки и отливки. Ликвация возникает в результате того, что сплавы, в отличие от чистых металлов, кристаллизуются не при одной температуре, а в интервале температур.
 8. Трещиностойчивость.
 9. Склонность к образованию линейных напряжений: термические, фазовые, усадочные.
 10. Способность взаимодействовать с окружающей средой и материалом литейной формы (в области жидкого состояния, при затвердевании, остывании, термической обработке).
- Как видно, в классификацию литейных свойств включены не только собственно литейные свойства, но и литейные дефекты.

Жидкотекучесть.

Жидкотекучесть – это способность металла заполнять литейную форму и воспроизводить все ее очертания, способствовать хорошему питанию отливки и удалению газов, что снижает опасность возникновения таких дефектов, как усадочные и газовые раковины, пористость, горячие трещины.

Жидкотекучесть определяется экспериментально с помощью технологических проб (спиралевидная, U-образная и др.) по формуле:

$$S = \frac{V_{\text{сп}} \rho}{\alpha \Pi (T_{\text{м}} - T_{\text{ф}})} [C(T_{\text{ж}} - T_0) + L], \quad \text{м}$$

где $V_{\text{сп}}$ – средний объем пробы на жидкотекучесть, м^3 ;

ρ – плотность сплава, $\text{кг}/\text{м}^3$;

α – средний коэффициент теплопроводности с поверхности расплава;

Π – периметр сечения пробы, м;

C – теплоемкость жидкого расплава, Дж/К;

T_m – температура расплава в период заливки;

T_{ϕ} – средняя температура литейной формы;

$T_{ж}$ – температура перегрева на ликвидусом;

T_0 – температура нулевой жидкотекучести;

L – теплота кристаллизации, выделяемая из единицы объема при охлаждении до температуры нулевой жидкотекучести T_0 .

Жидкотекучесть зависит от следующих факторов.

1. Физико-химических свойств сплава: химический состав, вязкость, поверхностное натяжение, плотность, теплоемкость, интервал кристаллизации, теплота кристаллизации, содержание неметаллических включений и газов.

Жидкотекучесть возрастает с увеличением содержания кремния, фосфора и особенно углерода, достигая максимума в чугунах эвтектического состава, определяемого суммой $C + 1/3Si + 1/2P$. Фосфор улучшает жидкотекучесть чугуна, уменьшая его поверхностное натяжение и вязкость, образуя легкоплавкую фосфидную эвтектику. Большое значение имеет повышенное содержание фосфора до 1,0-1,5% для художественного литья, где требуется повышенная жидкотекучесть.

Сера и марганец в отдельности слабо влияют на жидкотекучесть, но при наличии обоих этих элементов образуется MnS , сильно понижающий жидкотекучесть.

2. Свойства литейной формы (состав формовочной смеси, влажность, газопроницаемость, плотность, температура, теплоемкость и теплопроводность). При заливке в горячие прокаленные формы, жидкотекучесть увеличивается.

3. Условий заливки (гидростатический напор, скорость заливки, температура металла и формы).

Количество жидкой фазы, при которой наступает нулевая жидкотекучесть, зависит от строения и размеров первичных кристаллов. Например, нулевая жидкотекучесть стали и чугуна наступает соответственно при образовании 20 и 30% твердой фазы.

Для чугуна часто применяют спиральную пробу (рисунок 2.1), имеющую трапециевидное сечение площадью $0,56 \text{ см}^2$. После заливки измеряют длину заполнившейся части спирали, которая и характеризует жидкотекучесть.

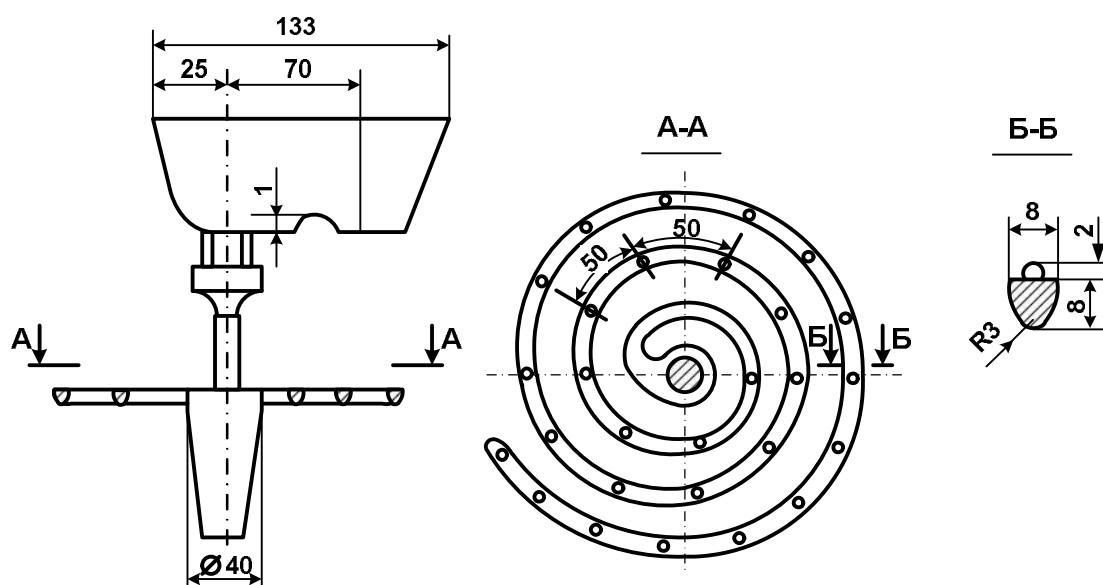
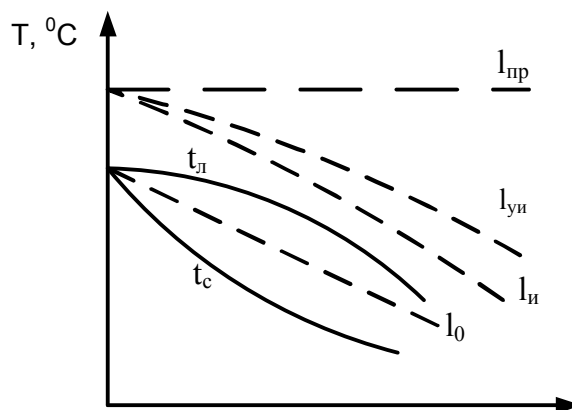


Рисунок 2.1 – Технологическая проба для определения жидкотекучести чугуна

Различают жидкотекучесть нулевую, истинную (параллельно нулевой), и условно-истинную (параллельно линии ликвидуса). Графически различные виды жидкотекучестей представлены на рисунке 2.2. Но т.к. на практике эти жидкотекучести определить очень сложно, то пользуются практической жидкотекучестью – определенной температура перегрева над линией ликвидуса.



l_0 – нулевая; $l_и$ – истинная; $l_{уи}$ – условно-истинная при постоянном перегреве над $t_{л}$; $l_{пр}$ – практическая

Рисунок 2.2 – Виды жидкотекучестей металлических расплавов

Мерой величины жидкотекучести может быть длина прутка L , которая была заполнена до остановки течения (рисунок 2.3).

Эта величина называется формозаполняемостью.

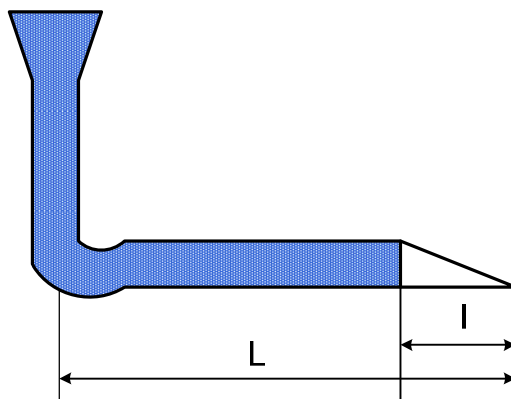


Рисунок 2.3 – Прутковая проба для определения формозаполняемости

Формозаполняемость оценивают по формуле:

$$F = \frac{L - \ell}{L} 100\% .$$

Усадка.

Усадкой называется свойство металлов и сплавов изменять (уменьшать) объем при затвердевании и охлаждении. Усадка относится к числу важнейших литейных свойств, так как с ней связаны основные технологические трудности в производстве фасонных отливок.

Различают три основных периода усадки:

- 1) в жидком состоянии до наступления температуры кристаллизации;
- 2) в процессе кристаллизации (в температурном интервале ликвидус-солидус);
- 3) в твердом состоянии.

Различают также линейную $\varepsilon_{\text{лин}}$ и объёмную ε_v усадки:

$$\varepsilon_{\text{лин}} = \frac{\ell_{\text{ф}} - \ell_{\text{отл}}}{\ell_{\text{отл}}} 100\%, \quad \varepsilon_v = \frac{V_{\text{ф}} - V_{\text{отл}}}{V_{\text{отл}}} 100\%,$$

где $\ell_{\text{ф}}$ – линейный размер литейной формы;
 $\ell_{\text{отл}}$ – размер отливки после затвердевания;
 $V_{\text{ф}}$ – объём формы;
 $V_{\text{отл}}$ – объём отливки при комнатной температуре.

У некоторых сплавов при определенной температуре могут происходить фазовые превращения, при этом происходит увеличение размеров, называемое предусадочным расширением.

Установлено, что линейная усадка начинается не с момента полного затвердевания отливки, а несколько раньше, когда образуется достаточно прочный скелет из соприкасающихся дендритов, способный противостоять давлению жидкого металла.

Литейная усадка – разница между линейными размерами модели $\ell_{\text{м}}$ и отливки $\ell_{\text{отл}}$:

$$\varepsilon = \frac{\ell_{\text{м}} - \ell_{\text{отл}}}{\ell_{\text{отл}}} 100\% .$$

Литейная усадка отличается от линейной, т.к. она зависит не только от свойств и состояния металла, но и от конструкции отливки, формы и других факторов, т.е. может происходить механическое и термическое торможение при кристаллизации. В связи с этим различают свободную и затрудненную усадки.

Полная объёмная усадка определяется:

$$\varepsilon_{v \text{ пол}} = \varepsilon_{v \text{ ж}} + \varepsilon_{v \text{ л-с}} + \varepsilon_{v \text{ т}},$$

где $\varepsilon_{v \text{ ж}} = \alpha_{v \text{ ж}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{лик}})$ – усадка металла в жидком состоянии;
 $\alpha_{v \text{ ж}}$ – средний объёмный коэффициент усадки металла в жидком состоянии;
 $\varepsilon_{v \text{ л-с}}$ – усадка в температурном интервале ликвидус-солидус;
 $\varepsilon_{v \text{ т}}$ – усадка в твердом состоянии.

Ликвация – химическая неоднородность сплава по сечению отливки.

Большая часть литейных сплавов не позволяет получать отливки с однородным химическим составом. В них наблюдается ликвация (микроликвация и макроликвация) – неоднородность химического состава (рисунок 2.4).

Микроликвация характеризуется химической неоднородностью по сечению кристалла, зерна, поэтому часто ее называют внутрикристаллической. Микроликвация является следствием неравновесной кристаллизации сплавов в реальных условиях формирования отливки. В интервале $t_{\text{л}} - t_{\text{с}}$ изменение состава твердой фазы характеризуется положением линии солидуса на диаграмме состояния. В условиях неравновесной

кристаллизации диффузионные процессы, особенно в твердой фазе, не успевают полностью пройти и образовавшаяся твердая фаза имеет неоднородный, неравновесный состав. В большинстве случаев микроликвация может быть устранена высокотемпературным отжигом отливок.

Макроликвация проявляется в неоднородном составе поверхностных и центральных зон, верхних и нижних слоев отливки или слитка. Такую ликвацию называют зональной.

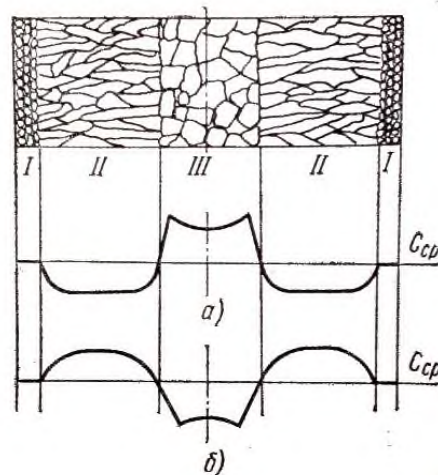


Рисунок 2.4 - Распределение ликвирующих элементов в зонах отливки при развитии прямой (а) и обратной (б) зональной ликвации (C_{cp} – концентрация ликвирующего элемента в исходном сплаве)

В крупных массивных отливках или слитках из сплавов с широким интервалом кристаллизации при медленном охлаждении часто наблюдается особый вид зональной ликвации, называемый конусом осаждения. В нижней части отливки или слитка находится сплав с пониженным содержанием легкоплавких компонентов, который образуется в результате осаждения твердых частиц, имеющих большую плотность по сравнению с жидкостью в период, когда этому процессу не препятствует конвекция. Это возможно только в тот период затвердевания, когда расплав потерял теплоту перегрева. Как было ранее показано, в центре отливки температура t_{008} поддерживается самое длительное время и, следовательно, оседание частиц здесь наиболее продолжительное. Поэтому зона неоднородного химического состава в данной части слитка имеет форму конуса с вершиной в центральной его части.

Наиболее типичное проявление зональной ликвации состоит в том, что в горизонтальном сечении отливки химический состав неодинаков. В зависимости от характера распределения ликвирующих компонентов сплава такую ликвацию называют прямой или обратной (рисунок 2.4).

Склонность к образованию трещин.

Внутренние напряжения в отливке происходят по следующим причинам.

1. Термические напряжения (σ_T), возникающие в результате неравномерности усадки в различных частях отливки (термическое торможение усадки);
2. Фазовые напряжения (σ_ϕ), возникающие в результате фазовых превращений в различных сечениях отливки;
3. Усадочные напряжения, возникающие в результате механического торможения усадки (σ_y).

В результате литейные напряжения определяются:

$$\sigma_{\text{л}} = \sigma_{\text{т}} + \sigma_{\text{ф}} + \sigma_{\text{у}}$$

Если величина напряжений $\sigma_{\text{л}}$ больше предела прочности, то в теле отливки произойдет разрушение.

Если материал отливки не способен противостоять действию возникающих напряжений, то произойдет коробление или искривление.

В зависимости от зоны влияния, остаточные напряжения делят три рода:

- 1) зональные – уравнивающиеся в объеме всей отливки.
- 2) микроскопические – уравнивающиеся в объеме отдельных кристаллов;
- 3) субмикроскопические – уравнивающиеся в объеме одной или нескольких элементарных кристаллических решеток.

Трещины бывают горячие и холодные.

2.2 Литниково-питающие системы

Литниково-питающей системой (ЛПС) называют совокупность каналов и резервуаров по которым жидкий металл из ковша поступает в полость отливки литейной формы. ЛПС оказывает существенное влияние на качество отливок и в ее случае неправильной конструкции или расчета, может стать причиной брака.

Основные элементы ЛПС (рисунок 2.):

- 1 – литниковая чаша для приема жидкого металла и частичного удержания шлака;
- 2 – стояк для передачи металла из чаши или воронки к другим элементам;
- 3 – литниковый ход, называемый шлакоуловителем в чугунном литье и коллектором в цветном, представляет собой горизонтальный канал для удержания шлака;
- 4 – питатели (литники) – предназначены для передачи металла непосредственно в полость формы.

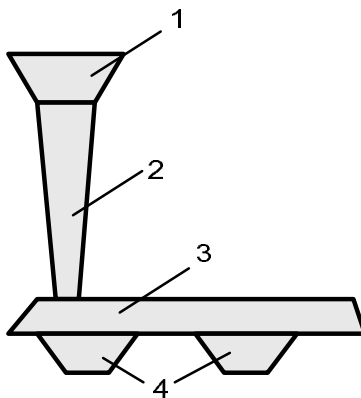


Рисунок 2.5 – Конструкция литниково-питающей системы

ЛПС подразделяются по гидродинамическому признаку на сужающиеся и расширяющиеся; по направлению течения расплава в полость формы на верхние, боковые и нижние (сифонные).

Для сужающихся ЛПС характерно последовательное уменьшение площади сечений: $f_{\text{ст}} > f_{\text{шл}} > f_{\text{пит}}$.

В расширяющихся ЛПС самое узкое место находится в нижнем сечении стояка: $f_{\text{ст}} < f_{\text{шл}} < f_{\text{пит}}$, т.е. скорость потока от стояка к питателям снижается, в результате металл поступает в полость формы более спокойно с меньшим разбрызгиванием (сталь, Mg, Al и др. сплавы).

Всегда стремятся, чтобы при обеспечении необходимого качества отливок расход металла на ЛПС был минимальным и обеспечивался максимальный выход годной продукции из металла.

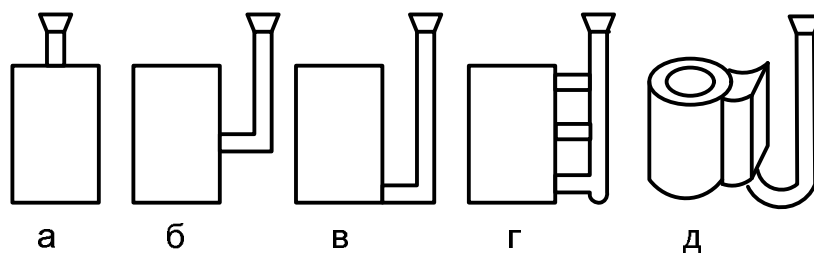


Рисунок 2.6 – Типы литниково-питающих системы

Верхняя ЛПС (рисунок 2.а) наиболее простая, обеспечивает направление затвердевания, но при падении металла с большой высоты, размывает литейную форму, поэтому применяется редко и только для невысоких отливок.

Боковая ЛПС (рисунок 2.б) питатель расположен по линии разъема, очень удобна при машинной формовке, уменьшается разрушение формы, но ухудшаются условия кристаллизации.

Сифонная ЛПС (рисунок 2.в), обеспечивает спокойное заполнение формы, без разбрызгивания и размыва, не образует плены, но и не обеспечивает направленной кристаллизации, т.к. в верхней части находится самый холодный металл, поэтому снижает выход годного.

Ярусная (рисунок 2.г) обеспечивает направленное затвердевание, но сложна при формовке и неприменима для заливки сплавов, склонных к пленообразованию.

Щелевая (рисунок 2.д) обеспечивает спокойное заполнение и направленное затвердевание, но при этом минимальный выход годного.

Расчет литниковой системы сводится к расчету узкого места (питателя – $f_{пит}$) с последующим определением площадей поперечных сечений остальных элементов:

$$f_{пит} = \frac{1000 \cdot M}{\rho \cdot \mu \cdot \tau \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}},$$

где M – масса отливки с прибылями, кг;

ρ – плотность жидкого металла, г/см³;

τ – время заливки, с;

μ – коэффициент расхода металла – суммарные гидравлические потери 0,4-0,7;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H_p – расчетный напор, см.

Время заполнения:

$$\tau = A \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot M},$$

где M – масса отливки, кг;

δ – преобладающая толщина стенки отливки, см;

A – коэффициент, зависящий от вида сплава ($A_{ст} = 1,7-2,0$; $A_{ст} = 1,7-3,0$;

$A_{Mg} = 2.3-4.5$).

Расчетный напор определится по схеме, представленной на рисунке 2.7 и формуле:

$$H_p = H_0 - \frac{P^2}{2C},$$

где H_0 – начальный напор, см;

C – высота отливки, см;

P – расстояние от горизонтальной оси питателя до верха отливки, см.

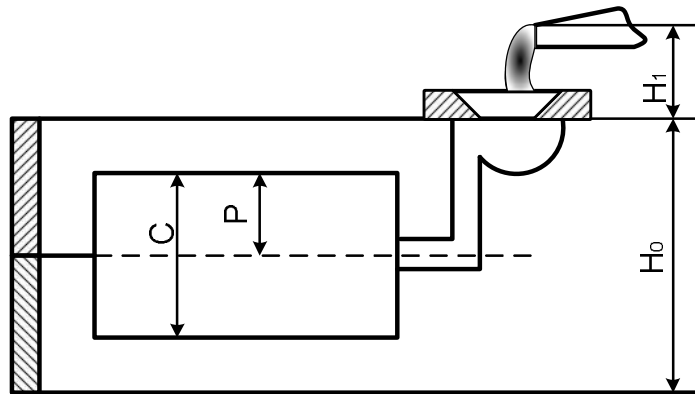


Рисунок 2.7 – Схема определения расчетного напора

Если заливка ведется через литниковую воронку, то напор изменится:

$$H_p = H_0 - \frac{P^2}{2C} + H_1,$$

где H_1 – высота от носка ковша до заливочной воронки.

Далее рассчитывают площади остальных элементов ЛПС:

- для чугунов $f_{ст}: f_{шл}: f_{пит} = 1:1,2:1,5$;

- для сталей $f_{ст}: f_{шл}: f_{пит} = 1,1:1,3:1,5$.

Прибыли.

Прибыль – это часть ЛПС, предназначенная для устранения в отливке усадочной раковины и пористости.

Эффективная работа прибыли обеспечивается при соблюдении следующих условий:

- 1) прибыль должна затвердевать последней;
- 2) запас жидкого металла в прибыли должен быть достаточным для наполнения отливки во время ее затвердевания;
- 3) форма прибыли и ее расположение должны обеспечивать свободный доступ жидкого металла к отливке или питаемому узлу;
- 4) размеры и масса прибыли должны быть минимальными.

Прибыли бывают: открытые, закрытые, отводные, под избыточным давлением, обогреваемые экзотермическими смесями.

Все прибыли в зависимости от конфигурации отливки или теплового узла могут иметь различную форму: шаровую, кольцевую, прямоугольную, овальную и др.

Диаметр цилиндрической прибыли (таблица 2.1):

$$D = k \cdot \sqrt[3]{\frac{x\varepsilon}{1-x\varepsilon}} V_0,$$

где $k = f\left(\frac{H}{D}\right)$,

H – высота;

x – отношение объема прибыли к объему усадочной раковины;

ε – коэффициент объемной усадки сплава;

V_0 – объем питаемой отливки.

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов k и x для различных типов прибылей

Прибыль	H/D	k	x
Работающая под давлением:			
ниже атмосферного;	1	1,15	12
атмосферным, со стержнем или выступом;	1,2	1,07	7,5-9
сверх атмосферного;	1,3	1,04	5,5-7,5
Открытая	1,1	1,11	9-12
Теплоизолирующая	1,4	1,01	4-5,5
Экзотермическая	1,5	0,985	3-4

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Дайте характеристику основным литейным свойствам расплавов.
- 2 В чем отличие практической жидкотекучести от нулевой, истинной и условно истинной?
- 3 Как классифицируются литниково-питающие системы?
- 4 В чем заключается расчет литниково-питающих систем?
- 5 Дайте классификацию прибылей.
- 6 Для чего предназначена прибыль и при каких условиях она работает эффективно?
- 7 В чем заключается методика расчета прибыли?

Глава 3. Чугунное литьё

3.1 Общие сведения по железоуглеродистым сплавам

Русское слово чугун происходит от китайских «чу» – «лить» и «гун» – «дело», «ремесло». Постепенно термин чугун заменил в русском языке слова «литое железо».

Широкое распространение чугун получил благодаря хорошим технологическим свойствам и относительной дешевизне по сравнению с другими литейными сплавами. Область применения чугуна все больше расширяется вследствие непрерывного повышения его прочностных и технологических свойств, а также разработки чугунов новых марок со специальными технологическими свойствами.

Чугун – это многокомпонентный сплав железа с углеродом и другими элементами, характеризующийся эвтектическим превращением. Процессы, протекающие при кристаллизации, и образующиеся структурные составляющие можно проследить по двойной диаграмме равновесного состояния (рисунок 3.1).

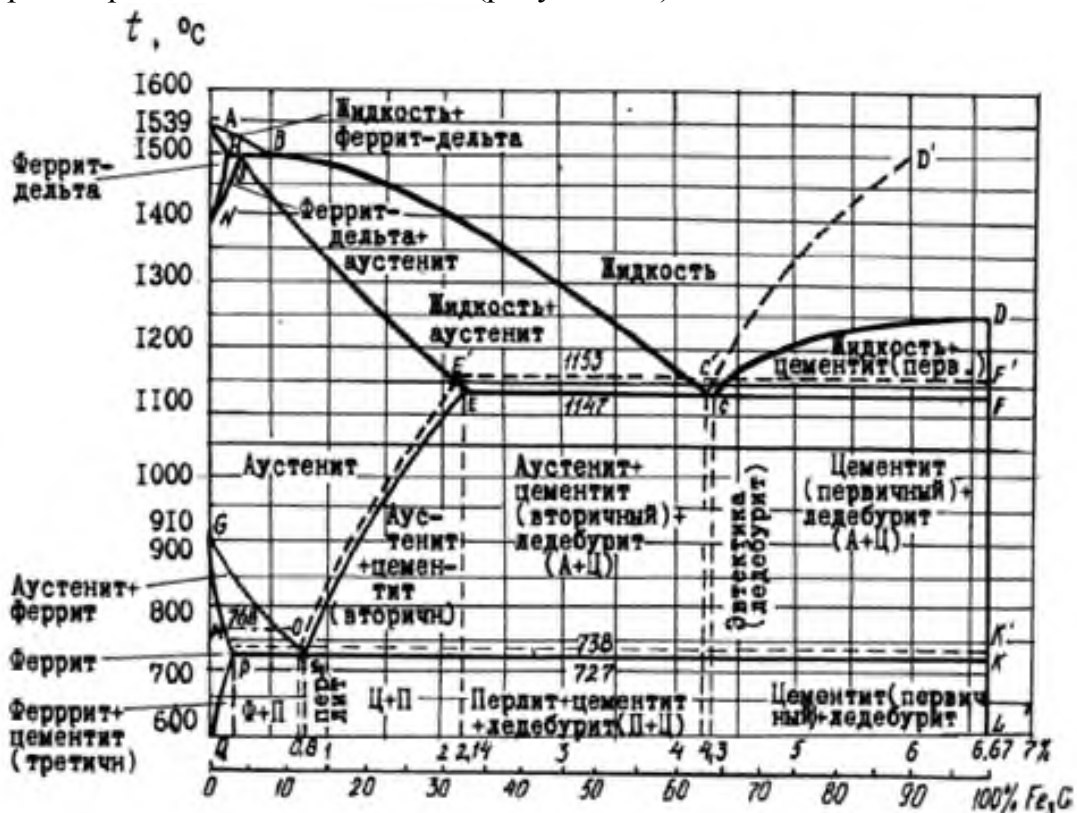


Рисунок 3.1 – Двойная диаграмма железо-цементит (линии: сплошные – стабильная система Ф–Г; штриховые – метастабильная система А(Ф)–Ц)

По диаграмме состояния системы железо-углерод судят о структуре медленно охлажденных сплавов, а также о возможности изменения их микроструктуры в результате термической обработки, определяющей эксплуатационные свойства. Сплошными линиями показана диаграмма состояния железо-цементит (метастабильная, так как возможен распад цементита), а пунктирными – диаграмма состояния железо-графит (стабильная).

В системе железо-цементит (Fe–Fe₃C) имеются следующие фазы: жидкий раствор, твердые растворы – феррит и аустенит, а также химическое соединение – цементит.

Аустенит (γ -Fe) – твердый раствор углерода в γ -железе. Предельная растворимость углерода в γ -железе 2,14%. Он устойчив только при высоких температурах, а с некоторыми примесями (Mn, Cг и др.) при обычных (даже низких) температурах. Аустенит обладает высокой пластичностью, низкими пределами текучести и прочности. Твердость аустенита 160-200 НВ.

Феррит может иметь две модификации – высоко- и низкотемпературную. Высокотемпературная модификация δ -Fe и низкотемпературная – α -Fe представляют собой твердые растворы углерода, соответственно, в δ - и α - железе.

Предельное содержание углерода в α -Fe при 723°C равно 0,02%, а при 20°C – 0,006%. Низкотемпературный феррит α -Fe по свойствам близок к чистому железу и имеет довольно низкие механические свойства, например, при 0,06% C: $\sigma = 250$ МПа; $\delta = 50\%$; $\psi = 80\%$; твердость – 80-90 НВ.

Цементит Fe_3C – химическое соединение железа с углеродом, содержащее 6,67% углерода. Между атомами железа и углерода в цементите действуют металлическая и ковалентная связи. Температура плавления около 1250°C. Цементит является метастабильной фазой. Время его устойчивости уменьшается с повышением температуры: при низких температурах он существует бесконечно долго, а при температурах, превышающих 950°C, за несколько часов распадается на железо и графит. Цементит обладает сравнительно высокими твердостью (800 НВ и выше) и хрупкостью. Прочность его на растяжение очень мала (40 МПа).

В системе железо–цементит имеются две тонкие механические смеси фаз – эвтектическая (ледебурит) и эвтектоидная (перлит).

Перлит (до 2,0%С) представляет собой смесь α -Fe + Fe_3C (в легированных сталях карбидов), образующуюся при 723 °С и содержании углерода 0,83% в процессе распада аустенита, и наблюдается визуально как структурная составляющая железоуглеродистых сплавов. Механические свойства перлита зависят от формы и дисперсности частиц цементита (прочность пластинчатого перлита несколько выше, чем зернистого): $\sigma = 800$ -900 МПа; $\delta < 16\%$; твердость 180-220 НВ.

Ледебурит является смесью двух фаз γ -Fe + Fe_3C , образующихся при 1130°C в сплавах, содержащих от 2,0 до 6,67% С, и наблюдается визуально как структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, главным образом, чугунов. Ледебурит обладает достаточно высокими прочностью (НВ>600) и хрупкостью.

Диаграмма состояния Fe – Fe_3C является комбинацией диаграмм простых типов. На ней имеются три горизонтали трехфазных равновесий: перитектического (1496°C), эвтектического (1147°C) и эвтектоидного (727°C).

Все линии на диаграмме соответствуют критическим точкам, то есть температурам, при которых происходят фазовые и структурные превращения в железоуглеродистых сплавах.

Линия ABCD – линия начала кристаллизации сплава (ликвидус), линия ANJESF – линия конца кристаллизации сплава (солидус).

В области диаграммы NJCE находится смесь двух фаз: жидкого раствора и аустенита, а в области CFD – жидкого раствора и цементита. В точке С при содержании 4,3% С и температуре 1130°C происходит одновременная кристаллизация аустенита и цементита и образуется их тонкая механическая смесь – ледебурит. Ледебурит присутствует во всех сплавах, содержащих от 2,0 до 6,67% С (чугуны).

Точка E соответствует предельному насыщению железа углеродом (2,0%С).

В области диаграммы AGSF находится аустенит. При охлаждении сплавов аустенит распадается с выделением по линии GS феррита, а по линии SE – вторичного це-

ментита. Линии GS и PS имеют большое практическое значение для установления режимов термической обработки сталей. Линию GS называют линией верхних критических точек, а линию PS – нижних критических точек.

В области диаграммы GSP находится смесь двух фаз – феррита и распадающегося аустенита, а в области диаграммы SEE' – смесь вторичного цементита и распадающегося аустенита.

В точке S при содержании 0,8% C и при температуре 723°C весь аустенит распадается и одновременно кристаллизуется тонкая механическая смесь феррита и цементита – перлит.

Линия PSK соответствует окончательному распаду аустенита и образованию перлита. В области ниже линии PSK никаких изменений структуры не происходит.

Структурные превращения в сплавах, находящихся в твердом состоянии, вызваны следующими причинами: изменением растворимости углерода в железе в зависимости от температуры сплава (QP и SE), полиморфизмом железа (PSK) и влиянием содержания растворенного углерода на температуру полиморфных превращений (растворение углерода в железе способствует расширению температурной области существования аустенита и сужению области феррита).

Диаграмма стабильного равновесия Fe - Fe₃C отображает возможность образования высокоуглеродистой фазы - графита - на всех этапах структурообразования в сплавах с повышенным содержанием углерода. Диаграмма состояния стабильной системы железо - графит отличается от метастабильной системы железо-цементит только в той части, где в фазовых равновесиях участвует высокоуглеродистая фаза (графит или цементит).

На диаграмме состояния различают две области: стали и чугуны. Условия принятого разграничения – возможность образования ледебурита (предельная растворимость углерода в аустените):

- стали - до 2,14% C, не содержат ледебурита;
- чугуны - более 2,14% C, содержат ледебурит.

В зависимости от содержания углерода (%) железоуглеродистые сплавы получили следующие названия:

- менее 0,83 – доэвтектоидные стали;
- 0,83 – эвтектоидные стали;
- 0,83–2,0 – заэвтектоидные стали;
- 2,0–4,3 – доэвтектические чугуны;
- 4,3–6,67 – заэвтектические чугуны.

3.2 Классификация чугунов

Чугун самый распространенный литейный материал: примерно 75% отливок получают из чугунов, которые классифицируют следующим образом.

1. По форме углерода, обуславливающего вид излома.

1.1. Серый чугун с пластинчатым графитом (СЧПГ) – графит находится в основном в свободном состоянии.

1.2. Белый чугун (БЧ) – чугун, в котором весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита, имеет матово-белый излом. БЧ обладает высокой твердостью, хрупкостью, практически не поддается обработке режущим инструментом. Широко применяется для изготовления деталей дробильного оборудования (брони шаровых мельниц, мелющие шары), лопастей шнеков.

1.3. Отбеленный чугун (половинчатый) – внешняя часть состоит из БЧ, а внутренняя из СЧ.

1.4. Ковкий чугун (КЧ) – чугун с хлопьевидным графитом, получается в результате отжига белого чугуна. Обладает высокой прочностью и пластичностью. Изготавливают детали, работающие при ударных и вибрационных нагрузках.

1.5. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) используется для деталей ответственного назначения, работающих при высоких статических, ударных и циклических нагрузках под воздействием агрессивных сред. Получение шаровидного графита достигается введением в расплав сфероидизирующих модификаторов.

1.6. Чугун с вермикулярным (червеобразным) графитом (ЧВГ). Занимает промежуточное положение между чугунами с пластинчатым и шаровидным графитом, сочетает хорошие литейные свойства с более высокими, чем у серого чугуна, прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Получают обработкой расплава РЗМ-содержащими лигатурами (Ce, Y).

2. По химическому составу: низко-, средне- и высоколегированные.

3. По назначению в зависимости от условий эксплуатации: износостойкие, коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, ростоустойчивые, антифрикционные, кавитационностойкие, со специальными электрическими свойствами.

3.3 Основные преимущества чугунных отливок

Практически все отрасли промышленности являются потребителями чугунных отливок, причем они очень разнообразны: толщина стенок – от 0,5 до 500 мм, а масса – от 1 г до 300 т и более.

Чугунные отливки составляют до 75% от общей массы литья из всех сплавов. Чугун, как конструкционный материал имеет следующие преимущества.

Низкая себестоимость. В таблице 3.1 приведены сравнительные себестоимости чугуна некоторых сплавов.

Таблица 3.1 – Соотношение себестоимости отливок из различных сплавов

Материал отливок	СЧ	КЧ	углеродистая сталь	легированная сталь	цветные сплавы
Относительная себестоимость, %	100	130	160	600	600

2. Высокие литейные свойства. Это обусловлено его химическим составом, низкой температурой плавления, малым интервалом кристаллизации, низкой температурой начала кристаллизации, графитизацией, низкой склонностью к газопоглощению и взаимодействию с материалом литейной формы, малые усадка, трещинообразование и ликвация.

Жидкотекучесть сплава зависит от его положения на диаграмме и тем выше, чем меньше температурный интервал кристаллизации. Поэтому, чугуны эвтектического состава обладают максимальной жидкотекучестью и используются для художественного чугунного литья.

За счет химического состава и графитизации усадка чугуна (1%) в два и более раза меньше, чем у стали (2-6%).

Чугунные отливки имеют более высокие технологические свойства по сравнению с отливками из других сплавов.

3. Высокая абразивная стойкость (БЧ – детали размалывающего оборудования: жернова, шары, бронеплиты).

4. Коррозионная стойкость (химическая инертность) – детали сантехнического оборудования.

5. Хорошая обрабатываемость СЧ при механической резке, т.к. графит одновременно является смазкой и обеспечивает короткую ломкую стружку.

6. Высокие антифрикционные свойства (прирабатываемость, противозадирные свойства).

7. Демпфирующая способность или циклическая вязкость - способность поглощать механические колебания – переводить их в тепловую энергию (станины станков).

8. Чугун, в отличие от стали обладает низкой чувствительностью к надразам. Поэтому, возникающие в чугунной отливке надрезы (раковины, поры, НВ, риски после механической обработки) в малой степени снижают ее конструкционную прочность. Это объясняется высокой циклической вязкостью чугуна.

9. Жаростойкость и сопротивление росту (ростоустойчивость) позволяют изготавливать из чугуна изложницы, шлаковни, секции котлов, колосники и т.д.

3.4 Физические и эксплуатационные свойства чугунов

Упругие и релаксационные свойства СЧ не регламентируются ГОСТом, но имеют большое значение, т.к. определяют конструкционную прочность материала, его жесткость и чувствительность к концентрациям напряжений. Релаксационные свойства характеризуют способность материала необратимо рассеивать энергию механических колебаний.

Упругие свойства можно выразить формулой:

$$\delta = \frac{1}{n \left(\ln \frac{A_0}{A_n} \right)},$$

где A_0 и A_n – начальная и конечная амплитуда колебаний;

n – число колебаний.

Основные теплофизические свойства, от которых зависит получение качественных отливок и их надежная эксплуатация включают: температурный коэффициент линейного расширения, линейные (объемные) и температурные характеристики фазовых превращений, теплоемкость и теплопроводность.

Температурный коэффициент линейного расширения α_t определяет возможность эксплуатации изделий в условиях повышенных температур. Для снижения внутренних термических напряжений ($\sigma_t = \alpha_t E \Delta t$) в условиях тепловой деформации должно быть минимальным.

Теплоемкость C [кДж/(кг·К)] одна из основных расчетных характеристик при анализе тепловых процессов, при затвердевании и охлаждении чугунных отливок. Теплоемкость чугуна определяется теплоемкостью его структурных составляющих.

Теплопроводность λ [Вт/(м·К)] обуславливает эксплуатационные свойства изделий в условиях знакопеременных тепловых нагрузок (кокили, изложницы, детали ДВС).

3.5 Кристаллизация и структурообразование чугуна

Свойства чугуна определяются его структурой. Поэтому большое значение имеет знание процессов, связанных со структурообразованием, особенно процесса графитизации, определяющего не только количество, форму и распределение графита, но и строение металлической основы.

Рассмотрим структурообразование чугуна на примере кристаллизации доэвтектического железоуглеродистого сплава. Затвердевание такого сплава начинается с выделения первичного аустенита переменного состава. Аустенит кристаллизуется в виде дендритов, количество и размеры которых определяются числом содержащихся в сплаве зародышей и величиной переохлаждения. Последняя при прочих равных условиях зависит от скорости охлаждения. Это приводит к тому, что при увеличении скорости охлаждения расплава растет объемная и линейная скорость кристаллизации, в результате получают более разветвленные дендриты. Увеличение переохлаждения может вызвать спонтанное образование дополнительных зародышей и размельчение дендритов.

Наиболее важным этапом кристаллизации чугуна является эвтектическое превращение, при котором происходит распад жидкости на аустенит и высокоуглеродистую фазу. Последняя определяет конечную структуру чугуна. Он будет белым, если высокоуглеродистой фазой является карбид (метастабильная система) или серым, если высокоуглеродистой фазой является графит (стабильная система). При смешанной кристаллизации получается половинчатый чугун. Характер эвтектической кристаллизации очень влияет на форму, величину и расположение графитовых включений в сером чугуне.

В случае относительно медленного охлаждения при эвтектическом превращении выделяется аустенит и графит. Аустенит эвтектики частично выделяется на кристаллах первичного аустенита и частично в непосредственном контакте с графитом, образуя аустенитно-графитовые колонии, чаще всего имеющие сферическую форму.

Образовавшийся в жидкой фазе кристалл графита разрастается не равномерно, а избирательно в направлении выступающих частей.

Кристаллизующийся одновременно с графитом аустенит устраняет при этом контакт графита с жидкой фазой. Рост графитового включения происходит диффузионным переносом атомов углерода из жидкого расплава через аустенитовую оболочку. Различная скорость диффузии приводит к различной скорости роста включения: повышенной в направлении ББ и пониженной в направлении ВВ, что определяет получение графита пластинчатой формы.

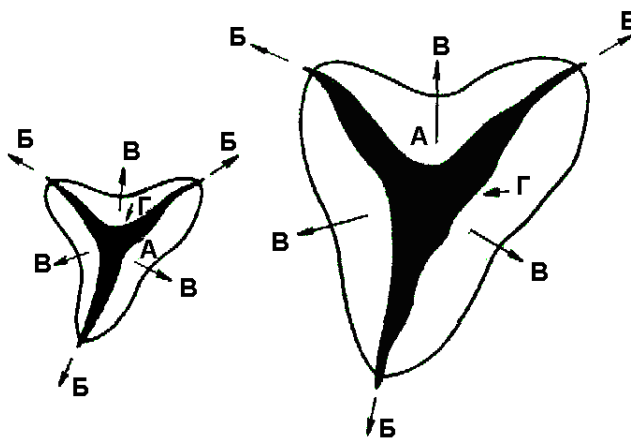


Рисунок 3.2 – Схема формирования пластинчатого графита

С увеличением скорости охлаждения количество аустенитографитовых колоний повышается, размер их уменьшается, и графит становится все более мелким.

На размеры и расположение графита может также влиять степень эвтектичности чугуна, т.е. мера, в какой сплав приближается по составу к эвтектическому. На характеристику «эвтектичности» чугуна влияет содержание углерода и наличие элементов (в первую очередь, кремния), сдвигающих критическую точку С на диаграмме в сторону уменьшения содержания углерода в эвтектике.

Чем меньше степень эвтектичности чугуна, тем большая часть сплава успевает закристаллизоваться в виде первичного аустенита и меньше жидкого расплава остается к моменту начала эвтектического превращения. Это способствует уменьшению количества графита, размельчению его включений и постепенному переходу от произвольного расположения к ориентированному вдоль осей дендритов первичного аустенита.

На условия первичной кристаллизации также влияет присутствие в расплаве неметаллических включений, могущих быть зародышами кристаллов и некоторых элементов, находящихся в весьма малых количествах. Например, Mg, Se и некоторые другие элементы, даже если чугуна содержит несколько сотых процента этих элементов, вызывают такие изменения условий кристаллизации, при которых графит растет в виде компактных включений шаровидной (глобулярной) формы.

Повышение скорости охлаждения сплава и связанное с этим увеличение переохлаждения может качественно изменить характер продуктов эвтектического превращения.

Продолжительность пребывания сплава в жидком состоянии в период эвтектического превращения, вследствие высокой скорости охлаждения, настолько сокращается, что выделение углерода из жидкой фазы и отдельная кристаллизация графита и аустенита происходят не в полной мере, в результате кристаллизующая фаза обогащается железом. В этом случае наряду с аустенитом кристаллизуются карбиды. Такое торможение кристаллизации графита может быть полным и выделившаяся высокоуглеродистая фаза будет целиком состоять из карбидов, что соответствует образованию структуры белого чугуна.

При промежуточных скоростях охлаждения торможение кристаллизации графита может быть частичным, тогда вместе с графитом кристаллизуются карбиды, что соответствует получению чугунов с половинчатой структурой.

Структура чугуна окончательно формируется при эвтектоидном превращении. При кристаллизации серого чугуна к моменту эвтектоидного превращения основными структурными составляющими являются аустенит и графит, образовавшийся при эвтектическом превращении и выделившийся из аустенита вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените при охлаждении в интервале температур от эвтектического до эвтектоидного превращения.

При эвтектоидном превращении происходит переупаковка атомов железа из кубической гранцентрированной решетки (γ -Fe) в кубическую объемноцентрированную (α -Fe) и диффузионное отделение углерода от железа. В результате превращения образуются структуры, состоящие из феррита и высокоуглеродистой фазы.

При очень малых скоростях охлаждения происходит полное диффузионное отделение углерода, кристаллизующегося в виде графита. В этом случае окончательной структурой чугуна будет феррит и графит. При скорости охлаждения больше критических величин, зависящих от состава чугуна, высокоуглеродистой фазой является цементит, который образует ферритно-цементитную эвтектоидную смесь – перлит. Окончательной структурой будет перлит и графит. При промежуточных скоростях охлаждения структу-

ра чугуна имеет графит, перлит и феррит. Повышение скорости охлаждения способствует получению более дисперсного перлита.

3.6 Влияние различных факторов на структуру и свойства чугунов

На процесс первичной и вторичной кристаллизации чугуна влияют химический состав, скорость охлаждения отливки, состояние жидкого чугуна и термическая обработка. Следовательно, совместное влияние этих факторов определяет и конечную структуру чугуна и его механические свойства.

3.6.1 Влияние химического состава

Влияние легирующих элементов на графитизацию чугуна и его структуру.

По химическому составу чугуны классифицируют на простые и легированные. Простые чугуны содержат, %: C=2,4-3,6; Si=0,5-3,0; Mn=0,2-1,0; P=0,04-0,8; S=0,02-0,20.

Легированные чугуны содержат больше указанного количества Si и Mn и различное количество специальных элементов. Особо важно влияние элементов на графитизацию в чугуне.

Все легирующие элементы по их влиянию можно разделить на три группы.

1. Графитизирующие – Ni, Cu, Co отчасти Al. Эти элементы в основном образуют растворы с ферритом (аустенитом) и слабо связаны с углеродом. Они понижают растворимость углерода в жидком и твердом растворах, а также содержание углерода в эвтектике и эвтектоиде, повышают эвтектическую температуру, одновременно снижая эвтектоидную, что обуславливает графитизирующее влияние элементов. Никель, способствуя графитизации структурно-свободных карбидов, задерживает распад эвтектоидных карбидов, тем самым стабилизирует перлит и способствует повышению его дисперсности. Аналогично, но в более слабой степени, влияет на графитизацию медь.

2. Препятствующие графитизации – Cr, Mo, W, V, B, Mg. Они образуют растворы замещения преимущественно с цементитом, например $(Fe, Cr)_3C$; $(Fe, Mo)_3C$; $(Fe, V)_3C$. При избыточном содержании элементы образуют специальные фазы – карбиды (например, Cr_7C_3 и V_4C_3). Благодаря образованию прочных карбидов элементы этой группы тормозят графитизацию и способствуют размельчению графитовых включений.

3. Элементы, образующие специальные фазы, служащие зародышами при процессе графитизации (Ti, Zr, Nb и др.). Вследствие высокой химической активности эти элементы практически целиком расходуются на образование карбидов, нитридов, окислов и только в небольшом количестве растворяются в феррите и цементите. Тугоплавкие включения, образующиеся еще в жидком расплаве, могут служить центрами кристаллизации графита. Поэтому титан, являющийся карбидообразующим элементом, в то же время способствует графитизации и размельчению графитовых включений.

Все указанные элементы в процессе вторичной кристаллизации тормозят распад аустенита. При этом повышается степень переохлаждения при эвтектоидном превращении, что способствует получению более дисперсного перлита, даже при относительно медленном охлаждении отливки.

Такие элементы, как никель и медь, расширяющие область γ -раствора понижающие температуру мартенситного превращения, способствуют получению аустенитной структуры.

Влияние, оказываемое легирующими элементами на кристаллизацию чугуна, обеспечивает повышение механических свойств. Особенно сильно влияют молибден, ванадий, хром, способствующие размельчению графитовых включений и повышению дисперсности перлита. Никель и медь увеличивают прочность в меньшей степени, так как они способствуют графитизации; положительная роль их связана только с повышением дисперсности перлита и выравниванием свойств в тонких и толстых сечениях отливки.

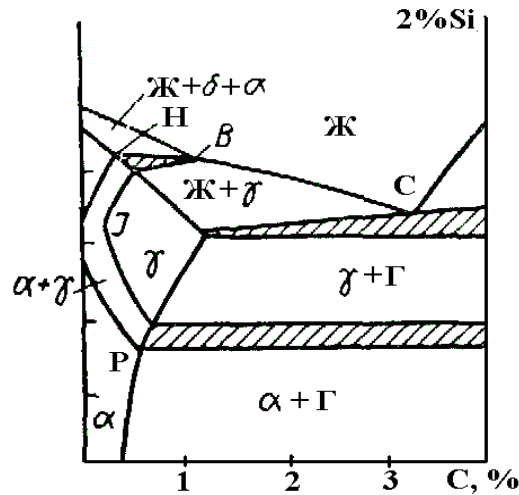
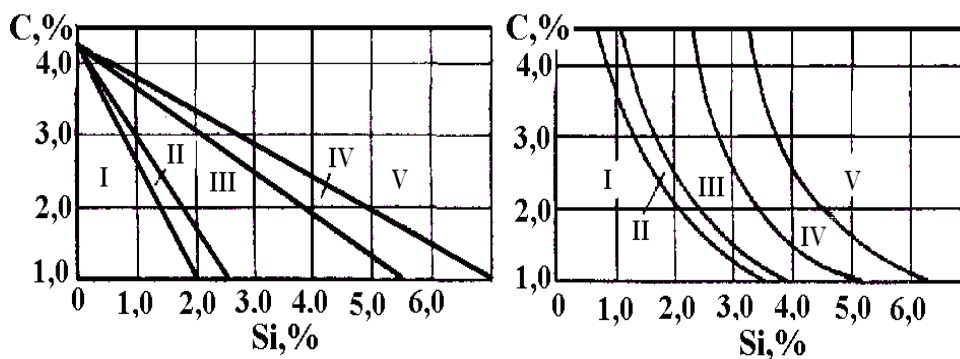


Рисунок 3.3 – Вертикальный разрез стабильной тройной диаграммы состояния Fe-C-Si при 2% Si

Влияние углерода и кремния на графитизацию чугунов.

Для характеристики влияния углерода и кремния на структуру чугуна предложен ряд структурных диаграмм (рисунок 3.4). Каждая диаграмма делится на пять областей, соответствующих чугунам определенной структуры:

- I – белый чугун (П + Ц);
- II – половинчатый чугун (П + Ц + Г);
- III – серый перлитный чугун (П + Г);
- IV – серый перлитно-ферритный чугун (П + Ф + Г);
- V – серый ферритный чугун (Ф + Г).



а – Маурера; б – Гиршовича Н.Г.

Рисунок 3.4 – Структурные диаграммы для чугуна

В основу построения диаграмм положены разные уравнения граничных линий. При содержаниях углерода, соответствующих содержанию в реальных отливках (2,4–3,6% C), данные обеих диаграмм почти совпадают.

Из диаграмм следует, что регулированием содержания углерода и кремния в чугуне можно получить всю гамму структур чугуна – от белого до серого ферритного.

Диаграммы построены для случая, когда другие факторы, влияющие на структуру чугуна, приняты неизменными. К относятся: скорость охлаждения чугуна, содержание других элементов, влияющих на графитизацию, перегрев чугуна и т.д.

Углерод и кремний оказывают не только количественное влияние на структуру чугуна, но и воздействует на дисперсность структурных составляющих.

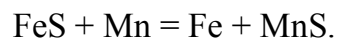
Повышение углеродного эквивалента C_{Σ} увеличивает количество графита Г и снижает количество перлита П, и одновременно способствует увеличению длины графитовых включений, а также уменьшению дисперсности перлита (увеличению значений P_d). Следовательно, снижение содержания углерода и кремния обеспечивает повышение прочности чугуна за счет уменьшения ферритной составляющей – получения дисперсности перлита, уменьшения содержания и размельчения графита.

Уменьшить содержание углерода и кремния можно только до определенного предела, обусловленного появлением структурно-свободного цементита и связанного с этим снижением механических свойств, повышением твердости и ухудшением обрабатываемости.

При некоторых условиях нижний предел содержания углерода зависит от образования междендритного точечного графита, отрицательно влияющего на механические свойства чугуна.

Влияние марганца и серы.

Марганец и сера – это элементы, тормозящие графитизацию, они имеют между собой большое химическое сродство и образуют в чугуне малорастворимые сульфиды марганца:



При этом частично нейтрализуется их влияние. Марганец, не связанный с серой, находится в растворе, распределяясь в определенном соотношении между цементитом и аустенитом (ферритом). Марганец снижает температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, расширяет область γ -раствора и способствует стабилизации и повышению дисперсности перлита. Благодаря этому повышение содержания марганца до 1,5% положительно влияет на механические свойства серого чугуна. Карбидизирующее действие марганца заметно сказывается только при относительно высоком его содержании (1,5–2,0%).

В чугунах с низким содержанием марганца сера присутствует в виде сульфидов, богатых железом, или в виде эвтектики, сильно тормозящих графитизацию, что снижает механические свойства из-за образования на границах зерен хрупкой эвтектики.

Нейтрализация вредного влияния серы и максимальная степень графитизации обеспечиваются при отношении $\frac{\text{Mn}}{\text{S}} = 4 \div 5$, т.к. сера находится в виде сульфидов марганца, не влияющих на графитизацию.

Влияние фосфора.

Фосфор подобно кремнию уменьшает растворимость углерода в жидком чугуне и сдвигает эвтектическую точку влево. Но в отличие от кремния фосфор снижает температуру эвтектического превращения.

В твердом чугуна растворимость фосфора мала (при 3,5% С она составляет примерно 0,3%). Избыточное количество выделяется в виде самостоятельной структурной составляющей – тройной фосфидной эвтектики Fe_3P-Fe_3C-Fe , плавящейся при $953^\circ C$.

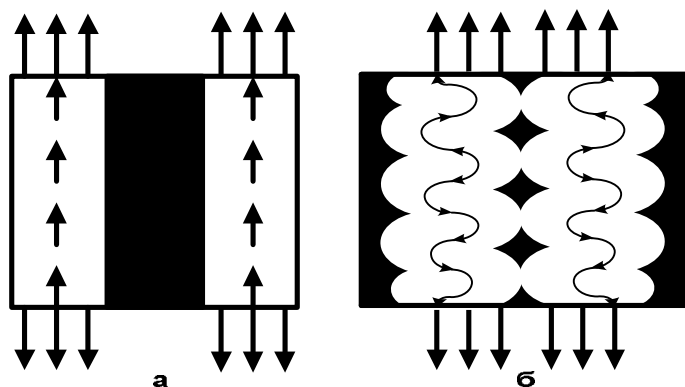
Фосфор оказывает незначительное влияние на графитизацию. Увеличение содержания фосфора, благодаря легированию феррита, вначале способствует повышению механических свойств; затем вследствие выделения фосфидной эвтектики в виде крупных включений или сетки по границам зерен снижает прочность. Это критическое содержание фосфора зависит от типа чугуна, содержания других элементов и составляет 0,3–0,8%.

3.6.2 Влияние графитовых включений на механические свойства чугуна

Графит сильно влияет на основные свойства чугуна, в первую очередь на прочность, характеризующую чугун как конструкционный материал.

Влияние графита на прочностные свойства происходит из-за ослабления поперечного сечения металлической матрицы в направлении, перпендикулярном приложению внешней растягивающей силы, «суживающего» действия, связанного с изменением длины и плотности силовых линий.

В случае соответствующим допущением, что все графитовые включения расположены в виде цилиндрических пустот вдоль оси цилиндрического образца, его «живое» поперечное сечение было бы ослаблено на 10-15% и, соответственно, повысились бы напряжения (рисунок 3.5).



а – графитовые включения расположены в виде цилиндрических пустот вдоль оси цилиндрического образца; б – графитовые включения расположены в виде пластин.

Рисунок 3.5 – Влияние графитовых включений на ослабление металлической матрицы чугуна

Пластинчатый графит способствует ослаблению металлической матрицы на 40-50% (рисунок 3.5,б).

Графитовые включения также оказывают надрезающее влияние на металлическую матрицу (рисунок 3.6).

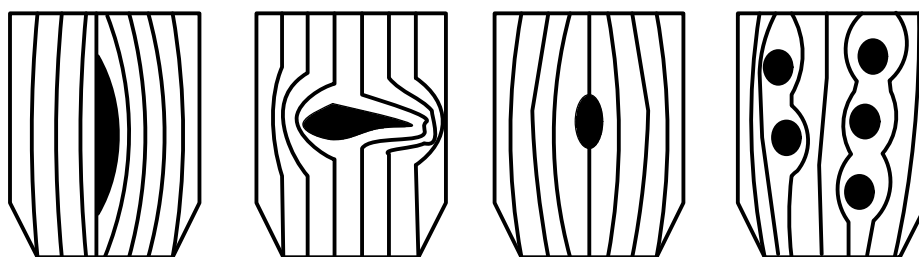


Рисунок 3.6 – Влияние формы графитовых включений на увеличение внутренних напряжений в металлической матрице

Увеличение плотности силовых линий соответствует повышению напряжений. По краям графитовых включений происходит наибольшее сближение силовых линий. Чем острее край включения, тем больше взаимное сближение силовых линий и тем больше локальное повышение напряжений. При превышении определенной величины перенапряжений в «надрезанной» металлической основе, последняя – разрушается.

Надрезывающее влияние пластинчатого графита на снижение прочности тем больше, чем больше количество графита и крупнее его размеры. Этим и объясняется разница в механических свойства чугунов и сталей с одинаковой матрицей.

В общем случае графит уменьшает:

- 1 – пределы прочности при растяжении, упругости и пропорциональности, кгс/мм²;
- 2 – пластичность, %;
- 3 – модуль упругости E , ГПа;
- 4 – чувствительность к надразам;
- 5 – повышает только циклическую вязкость, %.

Отрицательное влияние графита на эти показатели снижается при уменьшении количества графита и приближении его формы к шарообразной.

3.6.3 Влияние скорости охлаждения отливки

Скорость охлаждения отливки зависит от ряда факторов. В первую очередь, к ним относятся приведенная толщина отливки R , коэффициент теплоаккумулирующей способности формы b_f , температура заливки.

Независимо от того, под влиянием каких факторов изменялась скорость охлаждения, ее повышение уменьшает продолжительность кристаллизации и увеличивает скорость остывания в твердом состоянии. Повышение скорости охлаждения увеличивает переохлаждение и размельчает структурные составляющие. В зависимости от химического состава и жидкого состояния чугуна, при известной степени переохлаждения, эвтектическая кристаллизация может частично или полностью проходить по метастабильной системе.

Скорость охлаждения в интервале эвтектоидного превращения определяет соотношение феррита и перлита, а также степень дисперсности последнего.

Скорость охлаждения, оказывая влияние на структуру, тем самым влияет на механические свойства чугуна, что можно доказать результатами экспериментов. При эксперименте определяли скорость охлаждения и механические свойства в различных сечениях отливки массой 750 кг из чугуна (3,15% С и 1,72% Si), залитого в сухую форму (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Скорость охлаждения и механические свойства в различных сечениях отливки массой 750 кг.

Толщина отливки	Средняя скорость охлаждения в форме до 650 °С, °С/ч	Предел прочности при растяжении образцов, кгс/мм ²	Твердость, НВ
14	350	31,1–33,4	229
32	190	28,7–30,0	202
85	100	23,5–26,4	187

Различные сечения отливки имеют различные механические свойства, что может быть выражено следующей показательной функцией:

$$\frac{\sigma_{D_1}}{\sigma_{D_2}} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^\alpha,$$

где σ_{D_1} и σ_{D_2} – соответствующие свойства металла из брусков диаметрами D_1 и D_2 ; α – коэффициент однородности.

Чем больше величина α , тем больше отличаются свойства чугуна в различных сечениях отливки.

3.7 Влияние металлической матрицы и структуры чугуна на механические свойства отливки

Механические свойства чугуна зависят от величины литейного зерна. Чем меньше литейное зерно (больше его номер), тем выше прочность чугуна (рисунок 3.7). Размер зерна определяется 8 баллами по расположению феррита эвтектики.

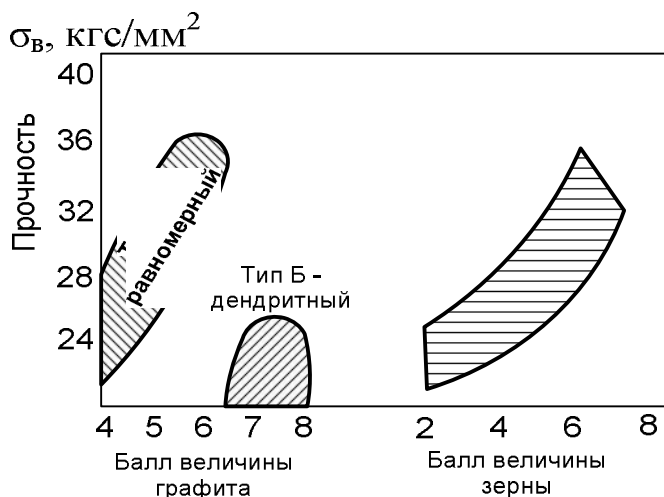


Рисунок 3.7 – Влияние размера графитовых включений и зерна на прочность СЧПГ

Величина зерна оказывает влияние на количество графитовых включений и на процесс вторичной кристаллизации, от которых, в свою очередь, зависит прочность чугуна.

Изучение влияния основной металлической матрицы необходимо проводить после термической обработки, т.к. после неё остаются без изменения форма и величина графитовых включений. Мелкодисперсные структуры (полученные после закалки), обладают

высокими прочностными свойствами. Но чугуны с мартенситной структурой характеризуется меньшей прочностью за счет появления больших напряжений, поэтому низкотемпературный отпуск значительно повышает прочность такого чугуна.

Механические свойства чугуна определяются главным образом структурой металлической матрицы, формой и размером графита и размером эвтектического зерна, с размельчением которого прочность повышается.

Модуль упругости зависит в основном от формы и расположения графита (рисунок 3.8), а твердость от металлической матрицы (рисунок 3.9).

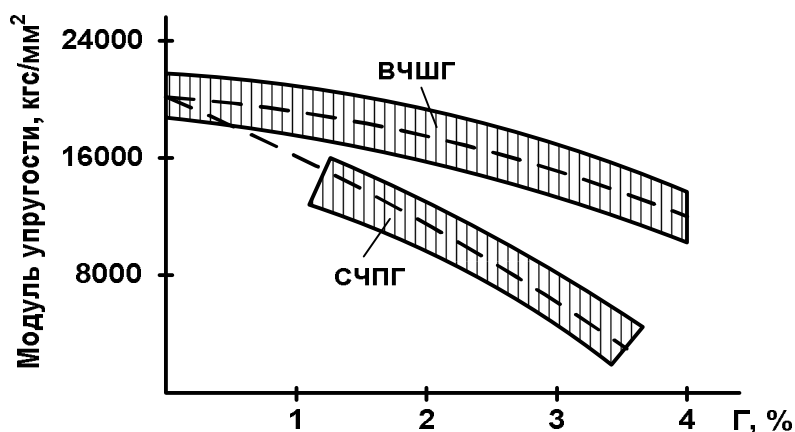


Рисунок 3.8 – Влияние формы и количества графита на модуль упругости чугунов

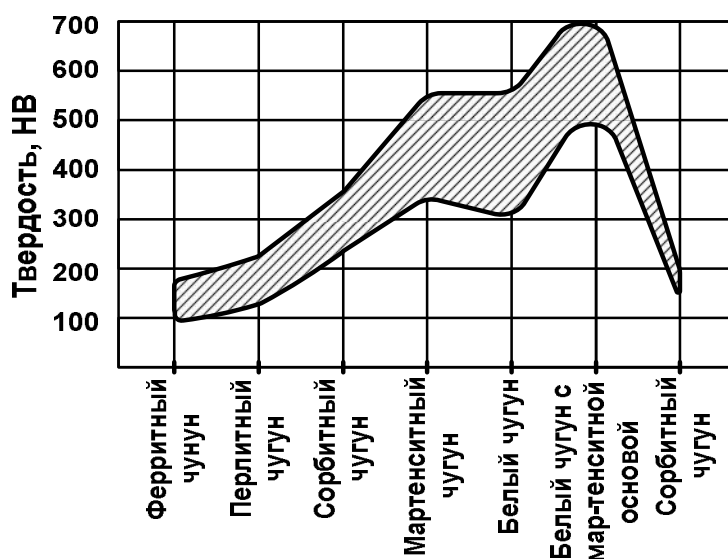


Рисунок 3.9 – Влияние металлической матрицы на твердость чугуна

Прочность чугуна является функцией модуля упругости и твердости:

$$\sigma_b = k \cdot E \cdot HB,$$

где k – коэффициент зависящий от вида чугуна, его значения для различных видов чугунов приведены в таблице 3.3.

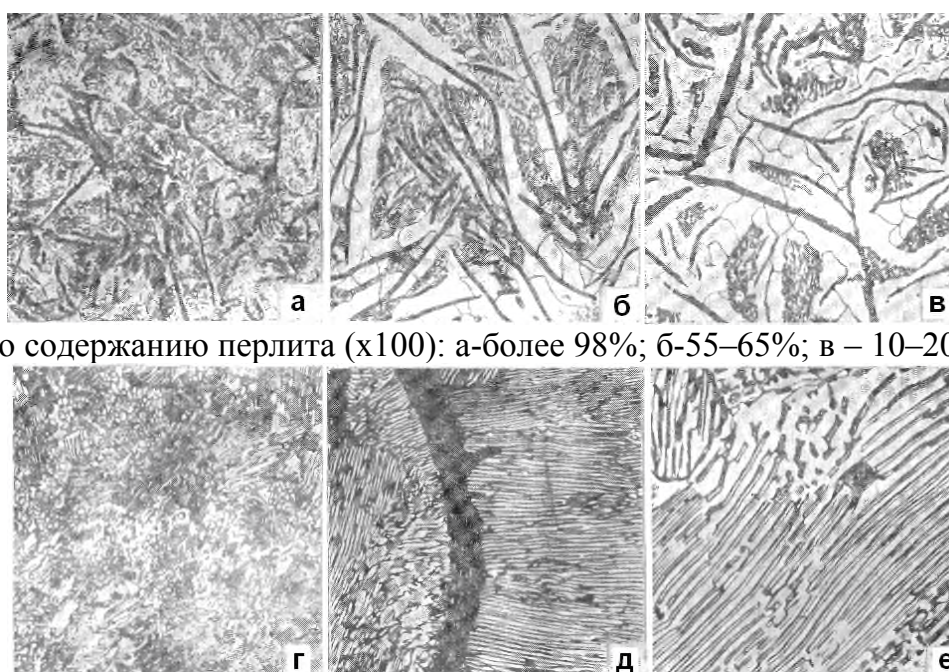
Таблица 3.3 – Значение коэффициента k в зависимости от вида чугуна

Вид чугуна	СЧПГ	Модифицированный СЧ	КЧ	ВЧШГ
Коэфф. $k \cdot 10^6$	8-10	10-12	12-14	14-16

Графит сильно влияет на основные свойства чугуна: в первую очередь, на прочность, характеризующую чугун как конструкционный материал.

Влияние графита на прочностные свойства складывается из ослабления поперечного сечения металлической основы в направлении, перпендикулярном приложению внешней растягивающей силы, и «суживающего» действия, связанного с изменением длины и плотности силовых линий, следующих разветвлениям металлических мостков, обусловленных хаотическим распределением включений графита.

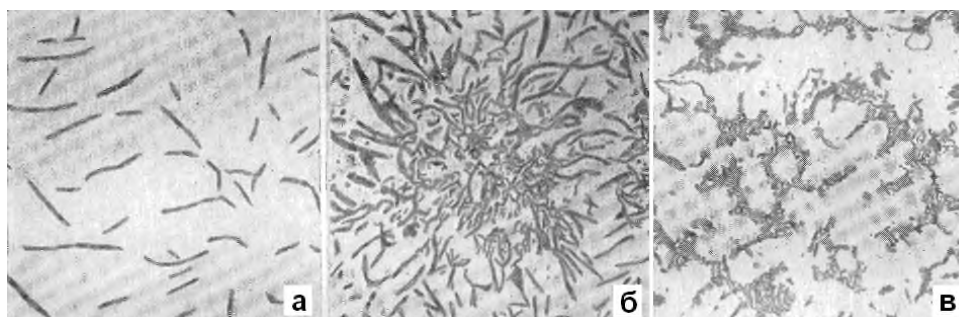
Структуры различных металлических матриц чугунов видов графитовых включений представлены соответственно на рисунках 3.10 и 3.11.



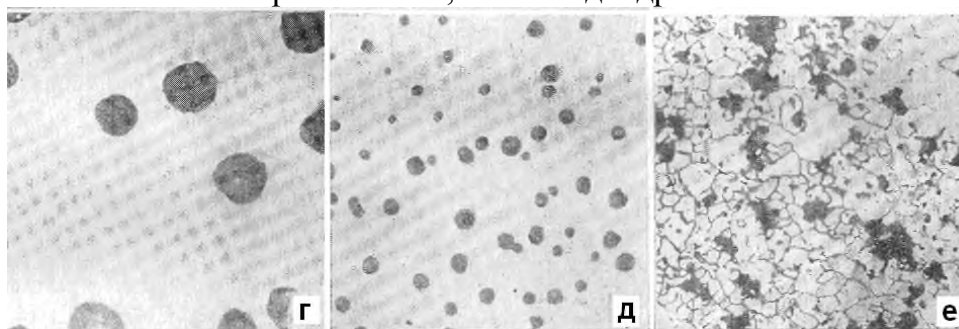
по содержанию перлита ($\times 100$): а-более 98%; б-55–65%; в – 10–20%;

по дисперсности перлита ($\times 1000$): г-сорбитообразный;
д-мелкопластинчатый; е-крупнопластинчатый

Рисунок 3.10 – Классификация структур металлической основы чугуна



пластинчатый графит (x100): а – с изолированными включениями;
б – розеточный; в – междендритный



точечный шаровидный графит (x100): г, д – диаметр включений соответственно 60–
100 мк и 25–40 мк; е – хлопьевидный графит (графит отжига)

Рисунок 3.11 – Классификация графитовых включений

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Дайте характеристику структурной диаграммы железо-цементит.
- 2 Дайте характеристику структурным составляющим чугуна: аустенит, феррит, цементит, перлит, ледебурит.
- 3 Как классифицируются чугуны?
- 4 Какие сплавы являются эвтектическими?
- 5 Как происходит графитизация чугуна?
- 6 От чего зависит конечная структура чугуна?
- 7 Перечислите преимущества чугуна, как конструкционного материала.
- 8 Как графитовые включения и размер зерна влияют на прочностные свойства чугуна?
- 9 Что описывают структурные диаграммы чугуна?

Глава 4. Получение отливок из различных видов чугуна

4.1 Отливки из серых чугунов

Механические свойства являются в большинстве случаев определяющими при выборе состава.

При эксплуатации отливки подвергаются различным напряжениям: растяжению, сжатию, износу, срезу, кручению и др. В зависимости от скорости приложения нагрузок, напряжения могут быть статическими или динамическими, а также постоянно действующими или знакопеременными.

Несмотря на такое разнообразие, напряжения могут быть сведены к нормальным (растягивающим или сжимающим $\pm\sigma$) и касательным (τ). Оба вида в реальных условиях обычно сосуществуют.

Деформации, образующиеся в результате указанных напряжений, могут быть упругими (обратимыми), пластическими (остаточными) или разрушающими.

Серые чугуны маркируются двумя буквами (СЧ) и числом, соответствующим пределу прочности при растяжении (таблица 4.1). Стандартом регламентируются только основные механические свойства – σ_b , $\sigma_{и}$ и НВ, именно по этим характеристикам определяется годность отливок.

Таблица 4.1 – Механические свойства и химический состав СЧПГ

Марка чугуна	Механические свойства			Средний химический состав, %		
	σ_b , кгс/мм ²	$\sigma_{и}$, кгс/мм ²	НВ	С	Si	Mn
Заэвтектические						
СЧ10	10	28	143-229	3,6	2,4	0,6
СЧ15	15	32	163-229	3,6	2,2	0,6
Эвтектический						
СЧ18	18	36	170-229	3,6	2,1	0,6
Доэвтектические						
СЧ20	20	40	170-241	3,4	1,8	0,8
СЧ25	25	46	180-250	3,3	1,8	0,8
СЧ30	30	50	181-255	3,1	1,1	0,8
СЧ35	35	55	197-219	2,9	1,0	0,9
СЧ40	40	60	207-285	2,6	2,7	0,3
СЧ45	45	65	285-299	2,3	2,7	0,3

Механические свойства СЧ зависят от химического состава и с увеличением прочности и твердости снижаются.

Углерод и кремний являются графитизирующими элементами и оказывают решающее воздействие на структуру и свойства нелегированного чугуна. Кремний передвигает эвтектическую и эвтектоидную точки влево и вверх, т.е. в сторону уменьшения содержания углерода в твердых и жидких растворах, а также повышает температуру превращений.

Каждый процент кремния снижает содержание углерода в эвтектике примерно на 0,3%, поэтому можно принять:

$$C_3 = 4,26 - 0,3Si,$$

где C_3 – содержание С в эвтектике;

Si – содержание кремния в чугуне.

Степень эвтектичности чугуна определяется следующим образом:

$$S_c = \frac{C}{4,26 - 0,3C}.$$

Её также можно оценить разностью содержания углерода в эвтектике и чугуне:

$$S'_c = (4,26 - 0,3C) - C = 4,26 - (C + 0,3Si).$$

Величину $(C + 0,3Si)$ называют углеродным эквивалентом.

При $C + 0,3Si = 4,26$, $s'_c = 0$.

Чугун, для которого степень эвтектичности составляет: $S_c = 1$ или $S'_c = 0$ называется эвтектическим.

Например, для чугунов марок от СЧ10 до СЧ45 степень эвтектичности $S_c = \frac{C}{4,26 - 0,3Si - 0,4S + 0,03Mn}$ снижается от 1,1 до 0,79, что несколько ухудшает их литейные свойства.

Высокий уровень механических свойств у СЧ40 и СЧ45 достигается также меньшим содержанием (на порядок) вредных примесей – фосфора и серы по сравнению с другими СЧ. Микроструктура серого чугуна с феррито-перлитной матрицей представлена на рисунке 4.1.

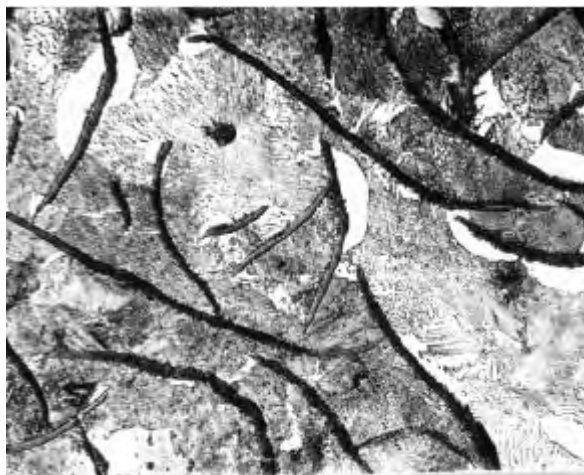


Рисунок 4.1 – Микроструктура серого чугуна с феррито-перлитной матрицей

Структура чугуна не выбирается произвольно, т.к. мягкий и малопрочный чугун можно получить только при ферритной матрице, а твердый чугун при перлитной матрице с дисперсным графитом.

С повышением марки чугуна возрастают прочностные свойства.

Прочностные свойства чугуна на сжатие значительно лучше, чем на растяжение, это объясняется наличием графитовых включений.

Механические свойства чугуна определяются соотношением структурных составляющих – в основном феррита, перлита, графита и цементита. Включения графита снижают прочность чугуна за счет уменьшения эффективной площади сечения. Кроме того, они играют роль внутренних концентраторов напряжений. Коэффициент концентрации напряжений для пластинчатого графита $K_{гр} = 7,0-7,5$, а для шаровидного – $K_{шг} \leq 3,5$.

Возникновение высоких напряжений в локальных объемах около пластинчатого графита обуславливает появление микротрещин.

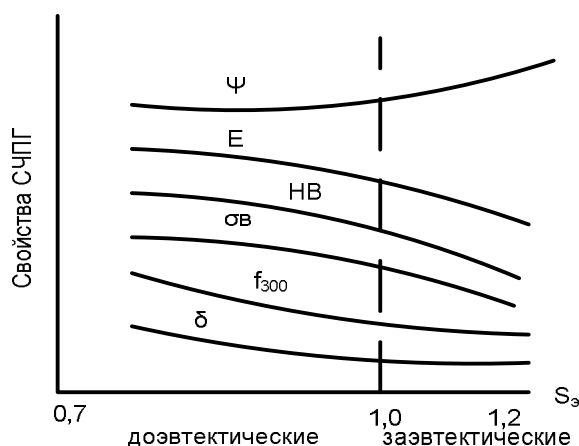
Наряду с этим наличие графитовых включений в структуре чугуна обеспечивает такие его свойства, как высокую циклическую вязкость и низкую чувствительность к надрезам.

С повышением степени эвтектичности S_3 механические свойства снижаются за исключением циклической вязкости (рисунок 4.2). Это обусловлено формированием малопрочной ферритной матрицы и образованием большого количества пластинчатого графита прямолинейной или игольчатой формы.

СЧПГ имеет очень низкую пластичность ($\delta, \psi, \%$).

Разрушение чугуновых образцов при испытании на растяжении происходит практически без пластических деформаций ($\delta_ч = 0,5-1,0\%$, $\delta_{ст} = 20-40\%$). В связи с этим приближенная оценка пластичности определяется по величине стрелы прогиба (f_{300} или f_{600}). Образцы диаметром 30 мм и длиной 300 или 600 мм.

С повышением марки чугуна стрела прогиба f_{300} увеличивается от 2-2,5 до 3-3,5 мм.



Ψ – циклическая вязкость%; E – модуль упругости ГПа; $HВ$ – твердость; $\sigma_в$ – прочность кгс/мм²; f_{300} – стрела прогиба, мм; δ – относительное удлинение, %.

Рисунок 4.2 – Влияние степени эвтектичности на механические свойства СЧПГ

Наилучшим комплексом механических свойств обладают доэвтектические чугуны (марок СЧ20-СЧ35), которые наиболее широко применяются для изготовления сложных и ответственных отливок. В таблице 4.2 представлены механические свойства структурных составляющих СЧПГ.

Таблица 4.2 – Механические свойства структурных составляющих СЧПГ

Структурная составляющая	$\sigma_в$ кгс/мм ²	$HВ$
Феррит ($Si = 2\%$)	40	95
Перлит	70	200
Цементит	2	550
Феррит эвтектический	-	400

Наиболее прочной структурой составляющей является перлит. Увеличение феррита и появление структурно свободного цементита снижает прочностные свойства.

Для повышения прочности чугуна при кристаллизации необходимо обеспечить следующие условия:

- 1 – уменьшение количества феррита, исключение выделения структурно свободного цементита, получение перлита с максимальной дисперсностью.
- 2 – уменьшение количества графита и размеров его включений.
- 3 – приближение формы графита к шаровидной, при которой ослабляется его надрезающее влияние.

4.2 Отливки из отбеленного чугуна

Отбеленный чугун применяют для изготовления специфической группы отливок, от которых требуется повышенная твердость и износостойкость наружного слоя при сохранении мягкой и относительно пластичной сердцевины. Из отбеленного чугуна отливают: прокатные валки станов, запорные клапаны шламовых насосов, дробильные или обдирочные плиты, брони конусных или шаровых мельниц, лопасти шнеков, мелющие и дробящие кольца зернодробилок, плиты бегунов, детали мукомольных машин.

Получение отбеленных отливок основано на возможности кристаллизации чугуна по стабильной или метастабильной системам в зависимости от состава металла, скорости охлаждения и других факторов. Поэтому, увеличивая скорость охлаждения наружных слоев отливки, например, применяя кокили, и изменяя содержание Si в металле, можно получить чугун с той или иной степенью отбела.

Образование отбела при заливке чугуна в кокиль можно продемонстрировать следующей схемой (рисунок 4.3). Кривая АВ – изменение линейной скорости первичной кристаллизации по толщине отливки. Она максимальна в месте соприкосновения с кокилем, и уменьшается по мере продвижения к центру. Характер этой кривой зависит от термофизических характеристик формы, температуры заливки и других факторов.

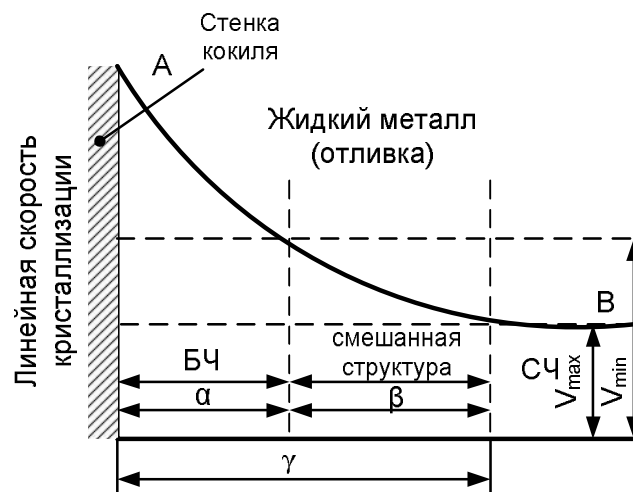


Рисунок 4.3 – Схема формирования отбеленного слоя в чугуне

Степень графитизации чугуна зависит от скорости охлаждения. Каждый чугун имеет минимальную критическую скорость кристаллизации (V_{\min}), выше которой графитизация полностью прекращается.

Также существует максимальная критическая скорость кристаллизации, ниже которой полностью отсутствует структурно свободный цементит.

Слой чугуна α , прилегающий к кокилю и охлаждающийся с высокой скоростью будет белым. В промежуточной области β образуется чугун со смешанной структурой (половинчатый).

Центральная часть отливки (правее зоны γ), имеющая скорость кристаллизации меньшую чем V_{\min} будет СЧ.

Величина зоны чистого отбела и переходного слоя имеет большое значение. По интенсивности влияния элементов на отбел и отбеленный слой их можно расположить в следующем порядке:



Величину и твердость отбеленного слоя регулируют изменением химического состава чугуна и скоростью кристаллизации (применением кокилей различной толщины, использованием обмазок с различной теплопроводностью, изменением химического состава периферийных и внутренних слоев отливки).

Как правило, чугун для отбеленных отливок отличается от СЧ меньшим содержанием Si.

Кроме химического состава чугуна на величину и свойства отбеленного слоя оказывают влияние: перегрев жидкого металла, режим плавки, свойства шихтовых материалов, литейная форма и т.д.

Все эти факторы в той или иной степени определяют природу состояния жидкого металла, наличие в нем зародышей, скорость охлаждения отливок.

Повышение температуры нагрева и времени выдержки чугуна в жидком состоянии, при одной и той же температуре заливки увеличивает глубину отбела за счет частичного растворения числа зародышей кристаллизации.

Также увеличение количества белого чугуна в шихте повышает глубину отбела.

С увеличением толщины кокиля (δ) глубина отбела возрастает только до определенного предела.

Повышение температуры кокиля, то есть снижение скорости охлаждения уменьшает глубину отбела и твердость.

Толстый слой противопригарного покрытия может полностью нейтрализовать действие кокиля.

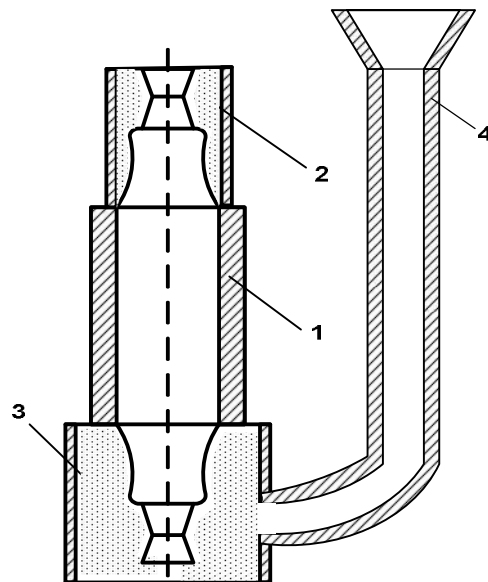
4.2.1 Изготовление литых отбеленных прокатных валков

Валки различают на прокатные и размалывающие.

Прокатные валки являются важной сменной частью прокатных станов, их расход от массы получаемого металлопроката составляет 0,5%. Поэтому экономичное и качественное изготовление валков является важной задачей.

По назначению валки делятся на гладкие - для листовых прокатных станов и калиброванные - для сортовых станов.

Валок состоит из бочки, шеек, служащих для поддержания валка в подшипниках и трезов для соединения с приводом (рисунок 4.4).



1 – кокиль; 2 – опока верха; 3 – опока низа; 4 – ЛПС
Рисунок 4.4 – Схема формовки прокатного вала

По характеру работы валки делятся на обжимные, черновые и чистовые. В зависимости от температурных условий прокатки – для холодной прокатки и для горячей прокатки.

К валкам предъявляют следующие требования.

1. Поверхность вала должна обладать высокой твердостью, износостойкостью с минимальной шероховатостью, чтобы не деформироваться от давления при прокатке
2. Сердцевина вала, шейки и трёфы должны обладать достаточной пластичностью во избежание поломок.

Твердые отбеленные валки применяют в листопрокатном производстве. Полутвердые валки из СЧ с перлитной или перлитно-цементитной структурой применяют при прокатке крупного сорта.

Габаритные размеры валков следующие: диаметр 150-1000 мм, длина 600-4000 мм.

Литые валки изготавливаются в основном вертикально, при этом бочка заливается в кокиль, а шейки, трёфы и прибыль в формовочной смеси.

В зависимости от назначения глубина отбела составляет 8-35 мм, с её увеличением прочность вала уменьшается и возрастает опасность поломки.

Содержание углерода назначается в зависимости от необходимого отбела. Si – в зависимости от диаметра вала, способа формовки.

Жидкий чугун заливают при температуре 1250-1270 °С, при более высокой температуре образуются трещины, при более низкой – раковины и корольки.

Перед заливкой кокиль нагрев до 200-300 °С и покрывают противопопригарным покрытием. Для уменьшения усадки прибыль засыпают древесным углем. Залитые валки остывают 10-12 часов, слишком ранняя выбивка может привести к образованию трещин.

Для повышения твердости, износостойкости, прочности чугун легируют.

Кроме валков с отбеленным слоем применяют также насквозь отбеленные малоуглеродистые низколегированные Cr-Ni чугуны с равномерной по сечению твердостью HB = 300.

Малое отношение Ni:Cr обеспечивает получение сквозного отбела, а низкое содержание углерода – высокую прочность.

Легируемые валки подвергаются термообработке для понижения твердости шеек и шрефов, для устранения литейных напряжений. Валки отжигают 24 часа при 620 °С,

снижение структуры происходит за счет снижения мартенситной структуры в тростит-сорбитную с коагуляцией карбидов.

Отжигают только шейки валков и трефы, бочки обкладываются защитным покровом – кирпичами.

Малоуглеродистые валки отжигают при более высокой температуре – 800-850 °С для выравнивания состава, затем быстрое охлаждение до 300-400 °С, сфероидизация при температуре ниже критической и снятие напряжений при 400-450 °С.

Механическая обработка отбеленных валков очень сложна, т.к. приходится пользоваться очень малыми скоростями резания – 0,15 м/мин, либо ограничиться только шлифовкой, что удорожает стоимость валков из-за большого расхода наждачных кругов.

4.3 Отливки из ковкого чугуна

Ковкий чугун (КЧ) – конструкционный материал, широко используемый для изготовления отливок во многих отраслях промышленности.

КЧ отличается от СЧ большой вязкостью, а от стали – лучшими литейными свойствами. Его применяют для изделий, подвергающихся динамическим нагрузкам.

На долю отливок из КЧ в общем балансе производства литья приходится 3,5%. Из-за высокой себестоимости он является неперспективным материалом.

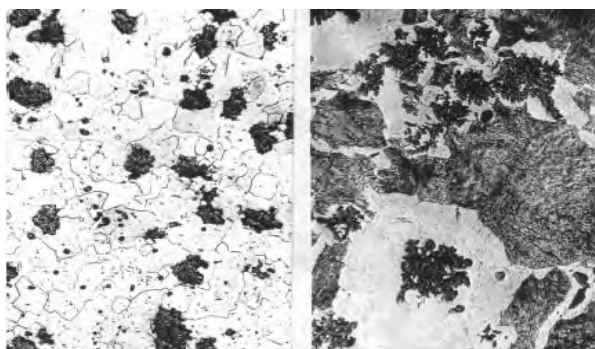
Ковким чугуном называется чугун с хлопьевидным или компактным графитом типа Гф1-Гф9, получаемый путем отжига БЧ определенного химического состава.

Получение отливок из КЧ состоит из двух этапов:

- 1 – получение отливок из БЧ;
- 2 – графитизирующий отжиг этих отливок.

В результате отжига происходит графитизация с большей или меньшей степенью обезуглероживания. Отливки, которые в литом состоянии были хрупкими и твердыми, после отжига (в определенных пределах) становятся пластичными и легкообрабатываемыми.

В зависимости от условий и режима отжига структура КЧ может быть: ферритной, феррито-перлитной, перлитной (рисунок 4.5) с большим или меньшим количеством включений графита (углерода отжига).



а – ферритная; б – ферритно-перлитная матрица
Рисунок 4.5 – Микроструктура ковкого чугуна

В зависимости от металлической матрицы ковкий чугун может быть ферритным черносердечным (ФЧКЧ), перлитным белосердечным (ПБКЧ) или перлитным (ПКЧ).

Излом ФЧКЧ темный, бархатистый с небольшой обезуглероженной светлой поверхностью, он имеет меньшую твердость, лучшую обрабатываемость, более высокую пластичность, поэтому он получил большее распространение, чем ПКЧ.

ПБКЧ имеет светлый, блестящий излом за счет легирования во время отжига. Из него изготавливают детали более высокой прочности. ПКЧ обладает также более высокими антифрикционными свойствами.

ГОСТ 1215-79 устанавливает 11 марок КЧ, они маркируются двумя буквами КЧ и двумя цифрами: первая – σ_B , вторая – δ , (%), регламентируется химический состав и твердость (НВ).

Механические свойства КЧ в основном зависят от типа матрицы, количества и дисперсности графита (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Механические свойства и средний химический состав КЧ

Марка чугуна	Механические свойства			Содержание элементов, %		
	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ	C	Si	Mn
ферритные чугуны						
КЧ30-6	30	6	100-163	2,7	1,3	0,5
КЧ33-8	33	8	100-163	2,7	1,3	0,5
КЧ35-10	35	10	100-163	2,6	1,2	0,4
КЧ37-12	37	12	110-163	2,5	1,3	0,3
перлитные чугуны						
КЧ45-7	45	7	150-207	2,6		0,6
КЧ50-5	50	5	170-230	2,6		0,6
КЧ55-4	55	4	192-241	2,6		0,6
КЧ60-3	60	3	200-269	2,6		0,6
КЧ65-3	65	3	212-269	2,5		0,6
КЧ70-2	70	2	241-285	2,5		0,6
КЧ80-1,5	80	1,5	270-320	2,5		0,6

ФКЧ наряду с удовлетворительной прочностью, обладает хорошей пластичностью и вязкостью разрушения. Высокие эксплуатационные свойства ФКЧ сохраняет до температуры 450 °С.

ПКЧ имеет более высокую прочность и износостойкость, но меньшую пластичность. Его подвергают следующим видам термообработки: нормализации, закалке и закалке с отпуском. В результате получается сорбит или тростит с повышенной прочностью.

Основные преимущества КЧ состоят в однородности его свойств по сечению отливки, отсутствие в них напряжений, сочетание высоких механических свойств с хорошей обрабатываемостью резанием. Хлопьевидный графит обеспечивает ломкость стружки и одновременно служит сухим смазывающим материалом.

Ферритная матрица с небольшой твердостью способствует снижению усилий резания. При одной и той же твердости обрабатываемость КЧ на 10-30% выше, чем обрабатываемость стальных поковок.

Литейные свойства ковких чугунов зависят от химического состава и состояния углерода.

Пониженное содержание (C+Si) дает меньшую степень эвтектичности, что приводит к снижению жидкотекучести ковких чугунов по сравнению с серыми чугунами.

Жидкотекучесть для ковких чугунов имеет важное значение, т.к. из них изготавливают корпусные сложные тонкостенные отливки. Для повышения жидкотекучести увеличивают перегрев металла перед заливкой.

Усадочные свойства ковких чугунов определяются состоянием чугуна до отжига, т.е. отбелом. Поэтому линейная усадка ковких чугунов в 1,5-2,0 раза больше по сравнению с серыми чугунами и составляет 1,6-2,3%.

Высокий модуль упругости ($E = 170$ ГПа), низкая теплопроводность в отбеленном состоянии с большой усадкой способствуют образованию горячих и холодных трещин.

4.3.1 Химический состав и термическая обработка ковких чугунов

Ковкие чугуны имеют пониженное содержание графитизирующих элементов (C+Si). Это необходимо для получения в литом состоянии полного отбеленного чугуна по всему сечению отливки. Если в структуре образуются включения пластинчатого графита, то при отжиге будет формироваться пластинчатый графит, а не хлопьевидный, в результате вместо ковкого чугуна получится серый чугун.

Следовательно, ковкий чугун должен иметь такой химический состав, который был бы максимально приближен к составу серого чугуна, но не содержал бы пластинчатого графита. Он должен быть предельно белым и находиться в половинчатой области структурных диаграмм.

Сочетание C и Si для отливок с разной толщиной стенок различно, чем толще стенка, тем меньше требуется C и Si.

Содержание Mn в зависимости от содержания S, т.е. $Mn/S = 3-4$.

Содержание других элементов определяется их влиянием на графитизацию. Хром как карбидообразующий элемент значительно увеличивает время отбела, поэтому его содержание находится в пределах 0,05-0,07%.

Ni и Cu способствуют графитизации.

Al, B, V, Bi используют как микропримеси для ускорения отжига.

Цель отжига – обеспечить графитизацию чугуна.

При этом возможны два варианта:

1 – полная графитизация и получение чисто ферритной матрицы;

2 – частичная графитизация, образуется перлитная или феррито-перлитная матрица.

Графитизирующий отжиг состоит из двух стадий (рисунок 4.6).

1 – нагрев до температуры 930-1050 °С и выдержка примерно 10 ч. На этой стадии происходит разложение первичного и ледебуритного цементита, в результате образуется аустенитная матрица с включениями хлопьевидного и коагулярного графита.

Затем температура снижается со скоростью $V_{\text{охл}} = 25$ °С/ч до температуры эвтектоидного превращения ~ 760 °С и далее начинается вторая стадия графитизации.

2 – медленное охлаждение со скоростью $V_{\text{охл}} = 5$ °С/ч во всем интервале эвтектоидного превращения (760-700 °С). При этом происходит распад $\text{Ц}_{\text{п}} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}$.

Конечная структура чугуна зависит от параметров второй стадии, т.е. скорости охлаждения или длительности выдержки в интервале критических температур.

Кратковременная выдержка в течение 5 ч дает перлитную матрицу с включениями коагулярного графита, вокруг которого ферритная кайма.

Длительная выдержка приводит к полному распаду цементита и получению ФКЧ. Длительность отжига является главным недостатком КЧ.

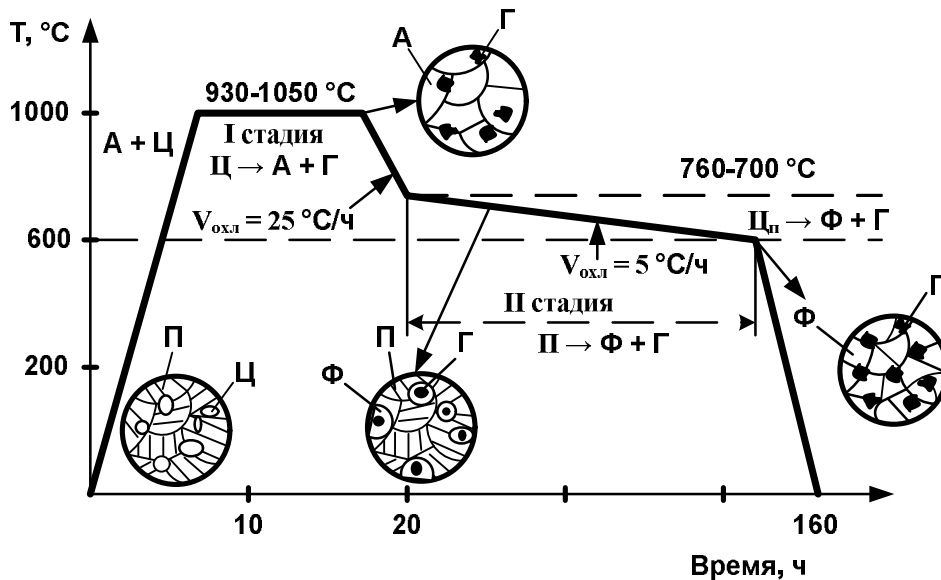


Рисунок 4.6 – Режим графитизирующего отжига с бч на фчкч

Для получения ПБКЧ режим отжига изменяется. Он сводится к длительной первой стадии в окислительной атмосфере при температуре 1000-1050 °С в течение 70-80 ч (рисунок 4.7). За это время происходит удаление значительной части углерода.

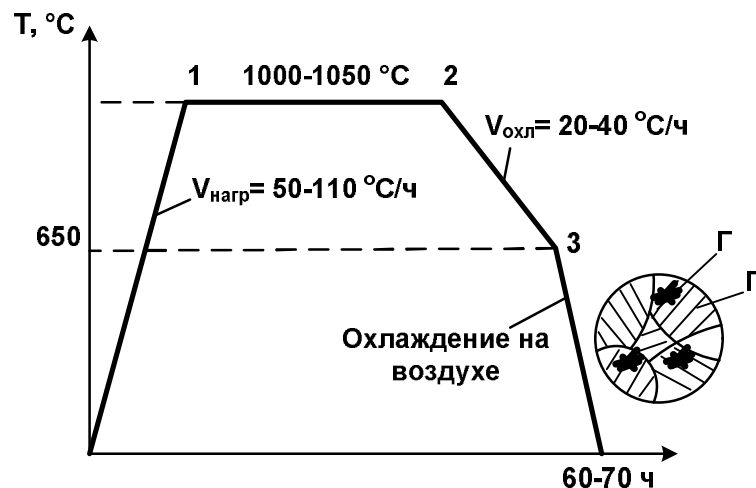


Рисунок 4.7 – Ускоренный режим отжига для получения ПБКЧ (ПКЧ)

Структура П+Г и поэтому этот чугун по составу напоминает графитизированную сталь. Применение окислительной атмосферы сокращает время отжига со 100 до 50 ч.

Вторая стадия отжига проходит при относительно большой скорости охлаждения – 25 °С/ч. Цементит не распадается при эвтектическом превращении, а остается в перлите. ПКЧ подвергается термической обработке – закалке и отпуску для получения сорбита или тростита, в результате чего повышаются механические свойства.

Иногда ПКЧ легируют медью, молибденом, марганцем. Для предупреждения выделения пластинчатого графита в толстых сечениях отливки в жидкий чугун вводят $W_i = 0,005-0,025$, $W = 0,002-0,0035$.

Обычный ПКЧ вытесняет ПБКЧ и получает более широкое распространение при изготовлении ответственных отливок.

4.3.2 Методы ускорения процесса отжига ковких чугунов

Работы по сокращению цикла отжига ведутся в двух направлениях:

- 1 – увеличение скоростей нагрева и охлаждения;
- 2 – воздействие на металл с целью ускорения самого процесса отжига.

В первом случае применяют электрические печи и контролируемые атмосферы (нейтральные или окислительные).

Во втором случае - повышение температуры первой стадии графитизации и искусственное увеличение числа центров кристаллизации. Повышение температуры первой стадии графитизации намного ускоряет процесс. При температуре 900 °С структурно-свободной цементит разлагается за 30 ч, а при 1100 °С его разложение происходит за 15 мин.

Но применение высоких температур опасно, т.к. отливки могут размягчаться, что приводит к искажению их профиля.

Время отжига можно уменьшить до 24-32 ч следующими методами.

Предварительной закалкой БЧ при температуре 970-980 °С в масле перед отжигом, при этом образуется большое количество центров кристаллизации, которые зафиксированы быстрым охлаждением. Этот способ применим к отливкам простой конфигурации, т.к. в сложных отливках могут возникать трещины.

Модифицированием жидкого чугуна графитизирующими элементами Al, В, Cu, Са и др. Происходит нейтрализация микропримесей, препятствующих графитизации и образования дополнительных центров кристаллизации.

Предварительная выдержка отливок при температурах 320-340 °С 8-10 ч.

4.4 Отливки из высокопрочного чугуна

Высокопрочным называется чугун с шаровидным графитом. Его металлическая матрица может быть: ферритной, феррито-перлитной, перлитной или бейнитной (после термической обработки). По ГОСТ 7293-85 установлено 10 марок высокопрочных чугунов (таблица 4.4, рисунок 4.8).

Таблица 4.4 – Механические свойства и средний химический состав ВЧШГ

Марка чугуна	Механические свойства				Содержание элементов, %		
	$\sigma_{в}$, кгс/мм ²	$\sigma_{т}$, кгс/мм ²	δ , %	НВ	С	Si	Mn
ферритный							
В4 38-17	38	24	17	140-170	2,7-3,6	1,3-2,4	0,3-0,6
В4 42-12	42	28	12	140-200			0,4-0,7
перлитно-ферритный							
В4 45-5	45	33	5	160-220			
В4 50-7	50	35	7	171-241	2,7-3,6	1,1-2,2	0,4-0,7
В4 50-2	50	35	2	180-260			
перлитный							
В4 60-2	60	40	2	200-280			
В4 70-2	70	45	2	229-300	2,7-3,6	2,2-2,5	0,4-0,7
В4 80-2	80	50	2	250-350			
бейнитный							
В4 100-2	100	70	2	270-360	3,4	3,4-3,8	0,4-0,7
В4 120-2	120	90	2	302-380	3,4	3,4-3,8	0,4-0,7

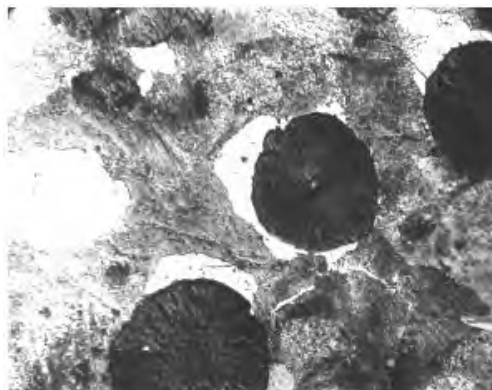


Рисунок 4.8 – Микроструктура ВЧШГ с феррито-перлитной матрицей

С повышением марки ВЧ, повышается прочность, но снижается пластичность.

Ферритные высокопрочные чугуны имеют минимальную прочность, при максимальной пластичности.

Феррито-перлитные и ферритные чугуны имеют более высокую прочность, но меньшую пластичность по сравнению с ферритными.

Бейнитные чугуны обладают максимальной прочностью, при равной пластичности с перлитными, за счет легирования их небольшими добавками (Cr-0.1%, Cu-0.4%, Ni-0,8%) и термической обработки (для перлитных - нормализация, для бейнитных - закалка с отпуском).

ВЧ обладают механическими свойствами, которые не достижимы в других видах чугунов, т.к шаровидный графит оказывает минимальное надрезающее влияние на металлическую матрицу и создает существенно меньшие напряжения по сравнению с пластинчатым графитом. Поэтому модуль упругости ВЧ ($E_{ВЧ} = 140-180$ ГПа), в 1,5-2 раза выше, чем у СЧПГ, при той же матрице, но циклическая вязкость в 2-4 раза ниже, чем у СЧПГ.

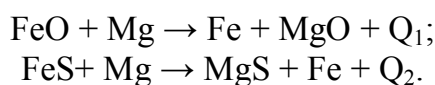
Обычно размер шаровидного графита от 15-360 мкм, очень часто в реальных чугунах, кроме шаровидного графита формируется компактный графит типа Гф9 или вермикулярный типа Гф6.

Существует 4 типа шаровидного графита: разорванная Гф10; звездообразная Гф11; неправильная Гф12; правильная Гф13.

ВЧ имеют повышенное содержание С=3-3,6%, что обеспечивает хорошие литейные свойства, также облегчается его выплавка в вагранках. Содержание Si=2-2.4%, в бейнитных ВЧ 3,4-3,8, что обеспечивает хорошую пластичность, графитизацию.

ВЧ получают обработкой жидкого металла сфероидизирующими модификаторами (Mg, Ce, Y, Ca, Na и др.), по названию элемента называется и вид высокопрочного чугуна.

Наиболее дешевый из этих элементов Mg, поэтому его используют чаще. При введении Mg происходит сильный пироэффект (интенсивное возгорание, с выделением белого дыма). Mg активный металл, поэтому он является сильным раскислителем, десульфуратором и нитридообразующим элементом:



При введении металлического Mg в жидкий чугун на воздухе от угарает до 95%. Степень усвоения Mg зависит от способа ввода, времени выдержки и длительности разливки.

С учетом всех статей расхода Mg можно записать:

$$Mg = \eta \cdot (Mg_{\text{усв}} + Mg_{\text{исп}} + Mg_{\text{окс}} + Mg_{\text{сульф}} + Mg_{\text{нитр}}),$$

где $\eta = Mg_{\text{усв}}/Mg_{\text{введ}}$.

После обработки жидкого чугуна сфероидизирующим модификатором рекомендуется дополнительно модифицировать графитизирующим – феррасилицием 75%, в количестве 0,3-2% от массы жидкого металла.

Очень эффективна комплексная обработка лигатурой (Mg+Ce+Y).

Y почти не угарает после введения его в жидкий чугун и даже остается после вторных переплавов.

Способы получения ВЧШГ.

Получение ВЧШГ состоит из двух этапов:

1. Выплавка чугуна;
2. Модифицирование жидкого чугуна сфероидизирующим модификатором.

Выплавку производят в вагранках или дуплекс-процессом (В-ДСП). Шихта состоит из чугунного, стального лома, возврата, ферросилиция, ферромарганца. За счет высокого углеродного эквивалента ($C_{\text{э}} = 5,4-6,0$) выплавка производится как обычного СЧ, при этом желателен избыток чушковых чугунов.

Физические свойства металлического Mg следующие: плотность (ρ) 1,71г/см³, температуры – плавления 651 °С, кипения 1107 °С; а жидкого чугуна: $\rho_{\text{чуг}} = 6,8-7,0\text{г/см}^3$, $t_{\text{пл.чуг}} = 1300-1350$ °С.

Поэтому при введении металлического Mg в открытых ковшах он практически весь угарает. Для увеличения степени усвоения применяют следующие способы.

1. Металлический Mg засыпается на дно ковша.
2. Mg вводится в виде тяжелых лигатур (Mg-FeSi, Mg-Ni, Mg-Cu, Mg-SiCa) или в виде брикетов (с содержанием Mg 8-20% и плотностью 7,0-8,5 г/см³).
3. Под избыточным давлением: в автоклаве или герметизированном ковше.
4. Непосредственно в литейной форме, в литнитковой системе которой имеется в специальная камера с магниевой лигатурой.

В зависимости от способа ввода расход магния от жидкого чугуна составляет:

- в открытых ковшах с помощью колокола 0,4-0,7%;
- в виде лигатур 2-2,5%;
- под избыточным давлением 0,2-0,3%.

интенсивность испарения 0,1%/мин.

Механизм формирования шаровидного графита до конца не изучен. Существуют десятки гипотез по его формированию, наиболее убедительные из них следующие.

1. Mg изменяет величину поверхностного натяжения между металлом и графитовым включениям, поэтому формируется ШГ, а не ПГ.
2. Mg адсорбируется в виде тонкой пленки на растущем графитовом включении и тормозит диффузию углерода.
3. При взаимодействии Mg с жидким чугуном образуются газовые пузырьки, куда диффундируют атомы углерода, сохраняя их форму.
4. В чугуне, содержащем Mg рост графита тормозится металлической матрицей.

При избытке Mg произойдет сквозной отбел, т.к. будет невозможно выделение свободного углерода.

При недостатке Mg будет образовываться вермикулярный или ПГ.

Существуют следующие типы магниевых лигатур: СИИТМИШ, СЦЕМИШ;

Ц1(%,: PЗМ=6-15; Mg=2-4; Ва=4-12; Al=10-18; Si=17-29; Fe_{ост.});

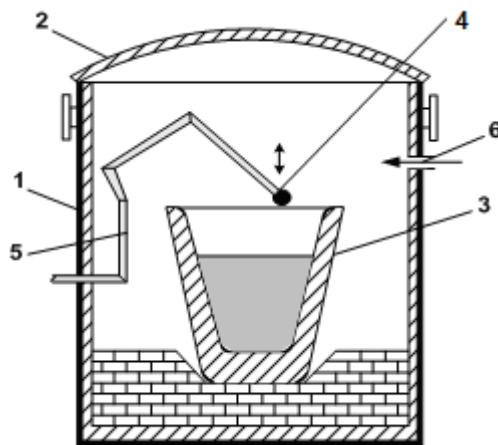
Ц2(%,: PЗМ=11-18; Mg=1,5-3,5; Al=5; Zr=0,2-1,8; Fe=12-27; Si_{ост.}).

Их расход составляет 1,2-2,0% от массы металла, при расходе 0,6-0,8% получается ЧВГ.

Введение Mg под избыточным давлением.

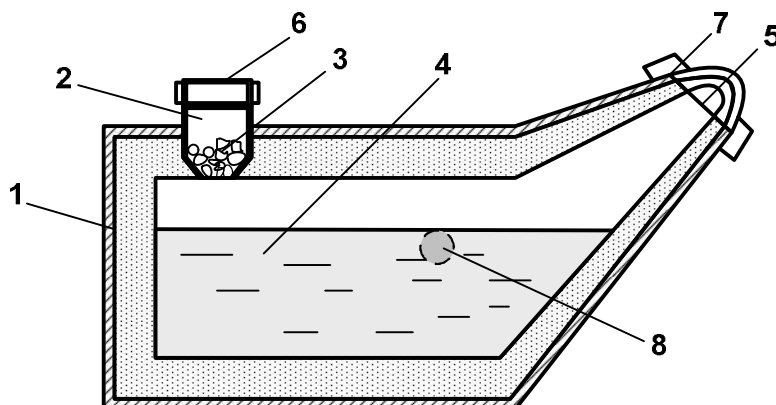
Известно, что с увеличением давления температура кипения возрастает. При увеличении давления над жидким чугуном до 5-6 атм. температура кипения Mg увеличивается с 1107 до 1350 °С.

Ковш ставится в открытый автоклав, который затем закрывается крышкой. В автоклав нагнетается газ до давления 5-6 атм. Расчетное количество Mg опускается в жидкий металл, выдерживается несколько минут, затем газ стравливают, открывают крышку и чугун с максимальной скоростью разливают в металлическую форму.



1 - автоклав; 2 – съемная крышка; 3 – ковш с чугуном; 4 - контейнер с магнием;
5 - механизм для опускания; 6 – патрубок для нагнетания воздуха

Рисунок 4.9 – Автоклав для модифицирования чугуна магнием



1 – поворотный герметизированный ковш; 2 – зарядная камера; 3 – магний; 4 – жидкий чугун; 5 – горловина для заливки чугуна; 6, 7 – съемные крышки; 8 – цапфы.

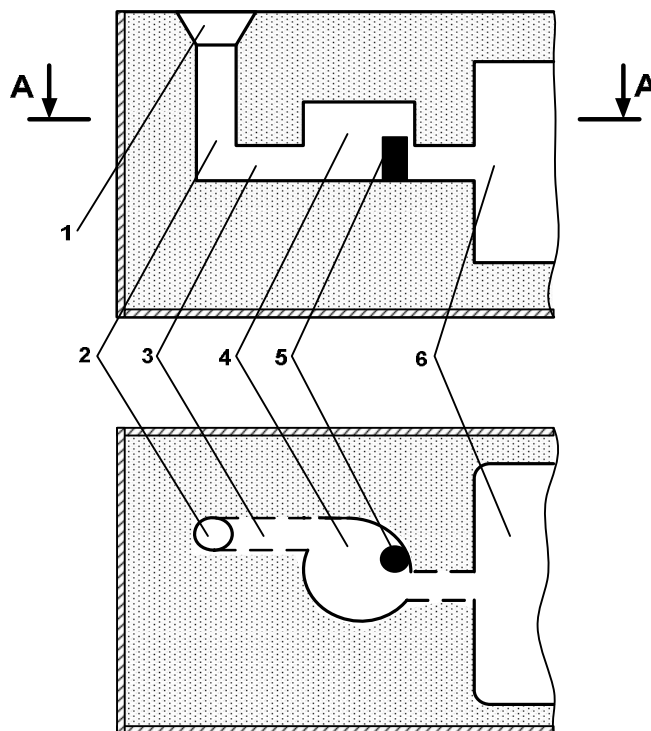
Рисунок 4.10 – Герметизированный ковш для модифицирования чугуна магнием

В зарядную камеру (2) закладывают расчетное количество Mg, закрывают герметично крышки (6, 7). Ковш поворачивают на цапфах на 90° влево, т.е. в вертикальное положение. Жидкий чугун взаимодействует с Mg, выделяется большое количество газов, поэтому над металлом создается избыточное давление в 5-6 атм. После выдержки в течение нескольких минут давление стравливают, открывают крышку и чугун переливают в разливочный ковш.

Введение Mg в литейной форме.

Данный способ имеет следующие преимущества: не требуется дорогостоящего оборудования; меньший расход Mg за счет модифицирования в самой литейной форме; нет потерь Mg на металл ЛПС.

Недостатки: сложность ЛПС, трудность обеспечения равномерного распределения Mg по сечению отливки, особенно тонкостенной; в случае избытка Mg могут происходить хлопки, выбросы жидкого металла.



1- заливочная воронка; 2 - стояк; 3 - питатель; 4 - центробежная камера; 5 - расчетное количество Mg; 6 - полость литейной формы.

Рисунок 4.11 – Схема введения магния в чугун с помощью литейной формы

4.5 Чугун с вермикулярным графитом

Чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) занимает промежуточное положение между ВЧШГ и СЧПГ. Он является перспективным материалом для изготовления ответственных крупногабаритных отливок, работающих в условиях частых теплосмен (детали ДВС). ЧВГ имеет более высокую прочность, теплопроводность, низкую чувствительность к изменению толщины стенки отливки по сравнению с СЧПГ (рисунок 4.12).

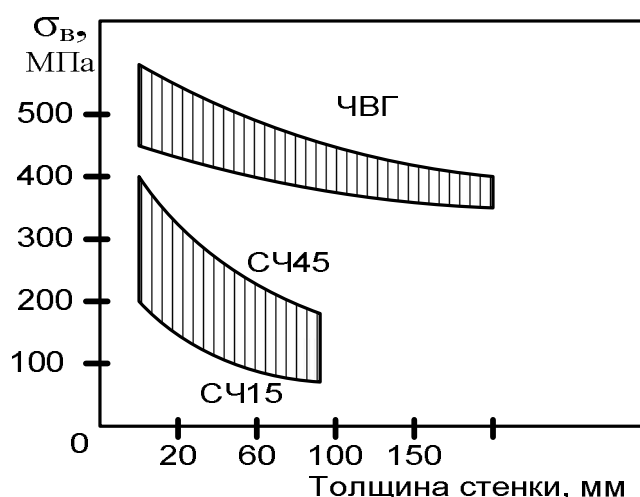


Рисунок 4.12– Влияние толщины стенки отливки на прочность чугуна с вермикулярным и пластинчатым графитом

ЧВГ получается обработкой жидкого металла сфероидизирующими модификаторами (Се, Y, и др. РЗМ) при расходе лигирующих 0,5-0,8%. Чугуном усваивается значительно меньшая часть модификатора – 0,05-0,15%.

Вермикулярный графит бывает двух видов: вермикулярный извилистый (Гр.5) и вермикулярный утолщенный (Гр.6).

Матрица у ЧВГ может быть перлитной или перлито-ферритной. Одновременно с вермикулярным формируется некоторое количество шаровидного и тонкопластинчатого графита. Наилучшими физико-химическими и эксплуатационными свойствами обладает ЧВГ при соотношении 70-80% вермикулярного и 20-30% шаровидного графита.

4.6 Термическая обработка чугунных и стальных отливок

Термическую обработку проводят для снятия напряжений, графитизации, повышения твердости и прочности, стабилизации структуры и обезуглероживания.

Часто в процессе одной термической обработки совмещают различные цели. Например, при проведении графитизирующего отжига снимаются напряжения.

Термическая обработка чугуна по характеру нагрева отливок может быть объемной или поверхностной, по температуре нагрева высоко- или низкотемпературной.

Существуют следующие виды термических обработок.

1. Снятие напряжений заключается в нагреве до определенных температур в зависимости от типа чугуна:

- СЧПГ 500-570 °С;
- ВЧШГ 550-650 °С;
- низколигированный 570-600 °С;
- высоколигированный 600-650 °С.

Время выдержки зависит от массы отливки, толщины стенок, их конфигурации и составляет от 1 до 10 ч.

Раньше снятие напряжений проводили на воздухе, в течение нескольких месяцев (вылеживание). В результате цементит перлита распадается при комнатной температуре на феррито-графитную смесь.

2. Графитизирующий отжиг (рисунки 4.6-4.7).

3. Сфероидизирующий отжиг, применяется для отливок ответственного назначения из КЧ и ВЧ, для повышения прочности и пластичности, за счет образования зернистого П. Заключается в нагреве до $T=730-750\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка несколько часов и охлаждение на воздухе (рисунок 4.13).

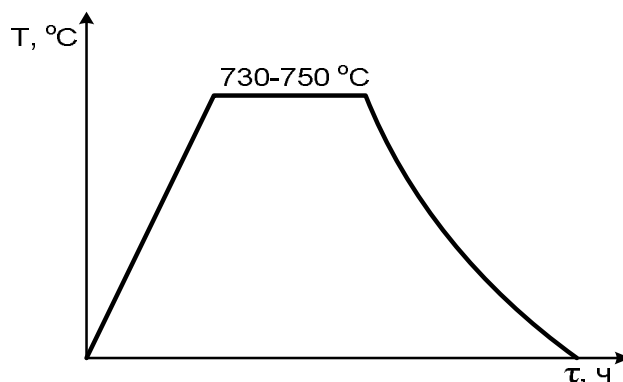


Рисунок 4.13 – Сфероидизирующий отжиг ковких и высокопрочных чугунов

Химический состав чугуна должен быть таким, чтобы в процессе сфероидизирующего отжига была устранена возможность образования феррита. Для этого повышают содержание в чугуне Mn, Si и других антиграфитизирующих элементов.

4. Обезуглероживающий отжиг. Проводят для удаления части углерода с поверхности зон отливок, для получения ПБКЧ. Производят в окислительной атмосфере (в коробах из нержавеющей стали отливки послойно укладывают с окалиной).

5. Отжиг для стальных отливок. Заключается в нагреве, выдержке и медленном охлаждении вместе с печью. В результате происходит укрупнение зерна, снятие напряжений. Производятся в основном для отливок из углеродистых сталей, с целью улучшения обрабатываемости (рисунок 4.14а).

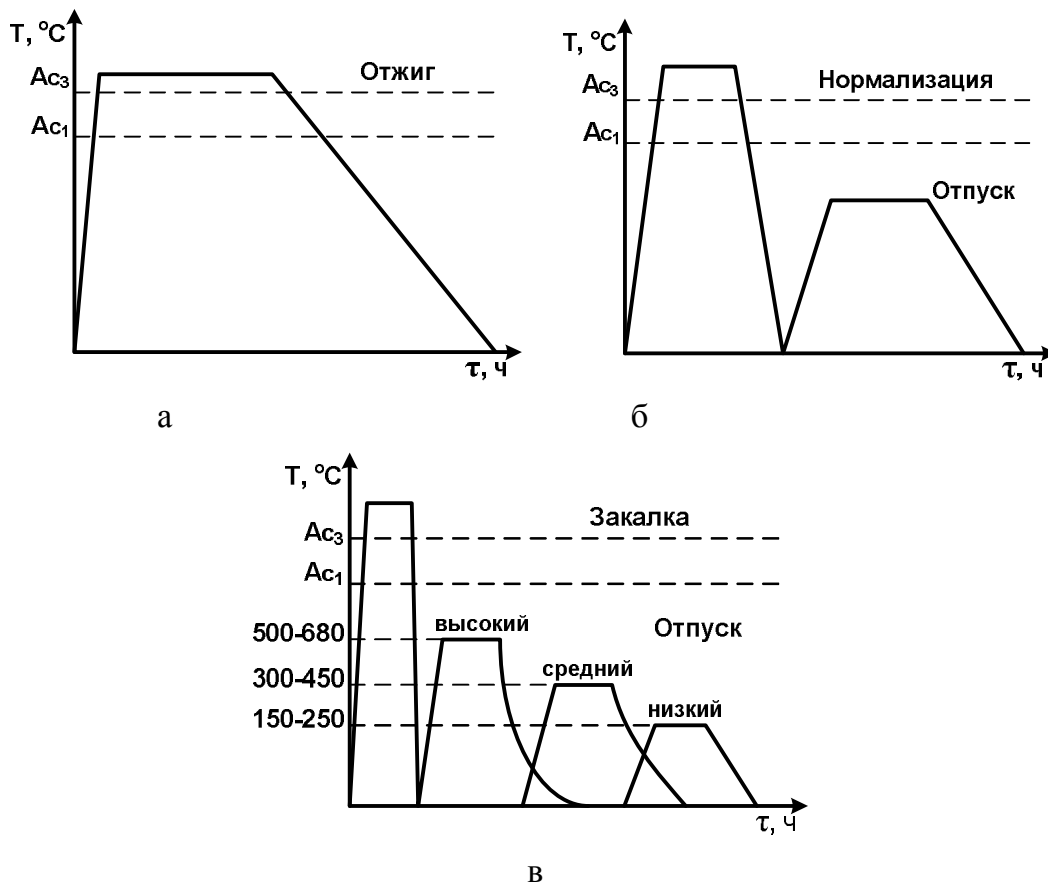
6. Нормализация – нагрев выше температуры A_{c3} , выдержка и охлаждение на воздухе (рисунок 4.14б).

7. Закалка – нагрев выше температуры A_{c3} , выдержка и охлаждение в воде или масле (рисунок 4.14б).

В результате нормализации и закалки измельчается зерно, повышается прочность, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость (для высоколегированных хромистых и хромо-никелевых сталей), но снижается пластичность и повышаются внутренние напряжения, следовательно снижается ударная вязкость.

Поэтому после нормализации или закалки производят отпуск. В зависимости от химического состава, массы и конфигурации отливок отпуск бывает: высоко, средне, низкотемпературный (рисунок 4.14в). В результате снижаются напряжения, повышается пластичность и ударная вязкость.

8. Химикотермическая обработка (ХТО). Заключается в высокотемпературном насыщении поверхностного рабочего слоя, за счет диффузии каким-либо элементом. По названию которого называется вид ХТО (цементация, азотирование, алитирование, хромирование и др.). Глубина насыщаемого слоя составляет от нескольких микрон до десятков мм. В результате повышается твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, антифрикционные свойства. Иногда производят комплексную ХТО – насыщение двумя и более элементами (нитроцементация).



а – отжиг; б – нормализация; в – закалка с отпуском
Рисунок 4.14 – Различные режимы термической обработки

Очень эффективно борирование, т.к. карбид бора уступает по твердости только алмазу).

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Как классифицируются и маркируются серые, ковкие и высокопрочные чугуны?
- 2 Дайте характеристику и опишите технологию производства белых чугунов.
- 3 Как графитовые включения влияют на прочностные свойства чугунов?
- 4 Что такое углеродный эквивалент?
- 5 Опишите технологию производства ковких чугунов.
- 6 Опишите технологию производства высокопрочных чугунов.
- 7 В чем преимущества чугуна с вермикулярным графитом?
- 8 Опишите виды термических обработок чугунных и стальных отливок.

Глава 5. Стальное литьё

5.1 Углеродистые стали

Для получения отливок используются углеродистые стали, содержащие 0,12–0,60 % С. Они маркируются числом, обозначающим среднее содержание углерода (в сотых долях процента) и буквой Л (таблица 9). Литейные стали отличаются от деформируемых большим допуском на содержание примесей, а также меньшей пластичностью.

В зависимости от назначения и предъявляемых требований все отливки из углеродистых и легированных сталей подразделяют на три группы:

1 – отливки общего назначения, контролируемые по внешнему виду, размерам и химическому составу;

2 – отливки ответственного назначения, контролируемые, кроме того, по прочности (σ_B или σ_T) и относительному удлинению;

3 – отливки особо ответственного назначения, контролируемые дополнительно к указанным характеристикам по ударной вязкости. В число контролируемых параметров могут включаться также микроструктура, пористость, герметичность и другие специальные характеристики.

Содержание углерода определяет марку стали и ее основные свойства.

Марганец (0,3–0,9%) раскисляет сталь и нейтрализует вредные примеси серы, а также несколько повышает прочность стали. С железом сера образует сульфид FeS и легкоплавкую эвтектику Fe–FeS, выделяющуюся по границам зерен, в результате чего возникает красноточность и склонность к образованию горячих трещин. При введении марганца в соотношении $\%Mn \geq 1,71\% S$ образуются более тугоплавкие сульфиды MnS, располагающиеся в виде неметаллических включений внутри зерна; в результате красноточность исчезает.

Кремний (0,2–0,5%) вводится в сталь как раскислитель. Даже в небольших количествах он заметно упрочняет феррит и снижает пластичность стали.

Сера и фосфор в сталях являются вредными примесями. Их содержание должно быть не более 0,045% S и 0,04% P в зависимости от группы и габаритных размеров отливок; с увеличением размеров требования ужесточаются.

5.1.1 Механические свойства углеродистых сталей

Механические свойства сталей (таблица 9) определяются содержанием углерода; по мере его увеличения от 0,15 до 0,55% σ_B возрастает от 400 до 600 МПа, а δ снижается с 24 до 10%, уменьшается также ударная вязкость с 0,49 до 0,24 МДж/м² (таблица 5.1). Это изменение свойств объясняется возрастанием доли перлита в структуре стали (рисунок 5.1).

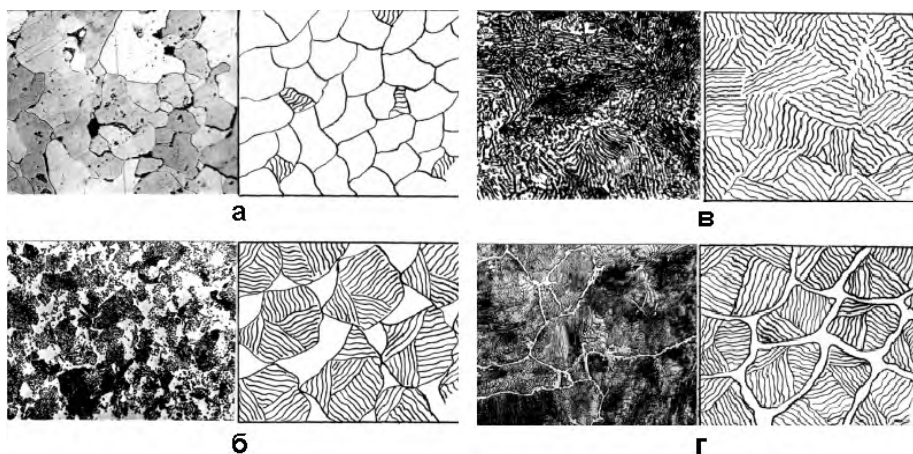
Отливки из углеродистых сталей обычно подвергаются термической обработке для снятия литейных напряжений и улучшения структуры, так как после завершения кристаллизации (или δ - γ превращения) при высокой температуре формируется крупнозернистая аустенитная структура. При охлаждении отливки, после достижения температуры A_3 в аустенитных зернах по определенным кристаллографическим плоскостям выделяются крупные пластинки феррита. Оставшийся аустенит при температуре A_3 превращается в перлит.

В результате возникает своеобразная видманштеттова структура (рисунок 5.2, а) с сильно пониженной пластичностью и вязкостью. Она исправляется термической обра-

боткой, основанной на фазовой перекристаллизации – отжигом или нормализацией при температуре 900 -860 °С (после нормализации обычно дается отпуск при 620-680 °С).

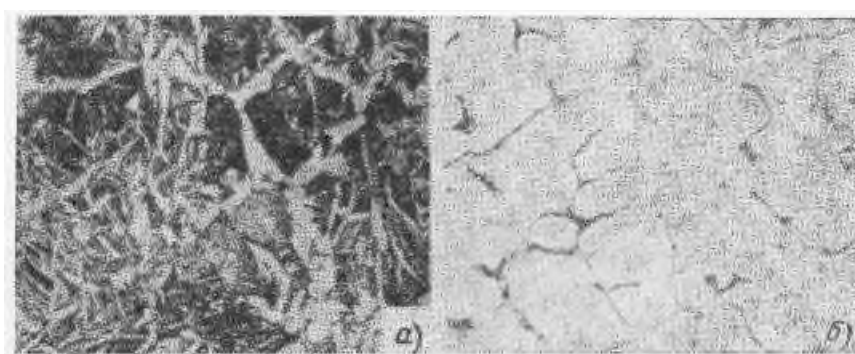
Таблица 5.1 – Механические свойства литейных углеродистых сталей по ГОСТ 977–75

Марка сплава	Содержание углерода, %	Механические свойства, не менее					
		Нормализация + отпуск				Закалка + отпуск	
		$\sigma_{в,}$ МПа	$\sigma_{т,}$ МПа	$\delta, \%$	$a_{н,}$ МДж/м ²	$\sigma_{в,}$ МПа	$\delta, \%$
15Л	0,12-0,2	400	200	24	0,5	-	-
25Л	0,22-0,3	450	240	19	0,4	500	22
30Л	0,27-0,35	480	260	17	0,35	500	17
35Л	0,32-0,4	500	280	15	0,35	550	16
45Л	0,42-0,5	550	320	12	0,3	600	14
55Л	0,52-0,6	600	350	10	0,25	860	15



а - доэвтектоидная сталь (0,1% С); б - доэвтектоидная сталь (0,6% С);
в - эвтектоидная сталь (0,8% С); г - заэвтектоидная сталь (1,2% С)

Рисунок 5.1 – Микроструктура углеродистой стали



а – сталь 45, видманштедтовая структура; б – сталь 12Х18Н9ТЛ,

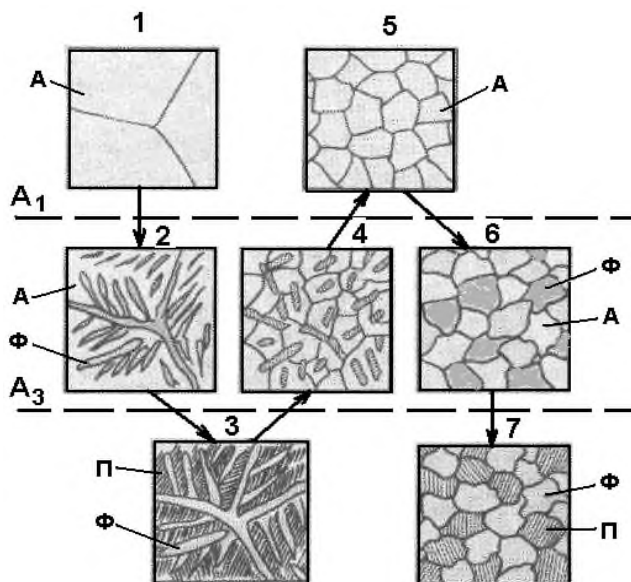
Рисунок 5.2 – Микроструктура стали в литом состоянии (x200)

При нагреве выше температуры A_3 образуется мелкозернистая аустенитная структура, а при охлаждении – равноосные мелкие ферритные и перлитные зерна. Изменение свойств низкоуглеродистых сталей в результате отжига:

Состояние отливки	Литое	После отжига
σ_B , МПа	400–500	400–450
НВ	180–190	140–160
δ , %	3–8	20–30.

5.1.2 Литейные свойства углеродистых сталей

Литейные свойства стали в значительной степени определяются содержанием углерода (рисунок 5.3).



1-3 – охлаждение в литом состоянии; 4-5 – нагрев для нормализации или отжига;
6-7 – последующее охлаждение

Рисунок 5.3 – Схема изменения микроструктуры при фазовой перекристаллизации стали

Линейная усадка начинает возникать при образовании 70-80% твердой фазы. Она заметно уменьшается с возрастанием содержания углерода до 0,25%, а в среднеуглеродистых сталях почти не изменяется (свободная усадка составляет 2,2%). Затрудненная усадка стали почти вдвое меньше свободной и составляет 1,0–1,6%. Величина усадки зависит от колебаний габаритных размеров отливок и технологических условий литья.

В литейных сталях принято различать три этапа линейной усадки в твердом состоянии:

1) доперлитная усадка $e_{дп}$ (1,3–1,4%) в аустенитном состоянии при охлаждении до температуры A_3 ;

2) расширение ($\sim 0,2\%$) при фазовой перекристаллизации в интервале температур A_3-A_1 ;

3) послеперлитная усадка $e_{пп}$ ($\sim 1\%$), возникающая в процессе охлаждения отливки от температуры A_T до температуры окружающей среды. Иногда перед первым этапом наблюдается предусадочное расширение $e_{пр}$ ($\sim 0,04\%$), связанное с выделением газов при затвердевании стали. Доперлитная и полная усадка в твердом состоянии уменьшается с увеличением содержания углерода в стали, послеперлитная усадка в литейных углеродистых сталях практически постоянна.

Объем усадочных пустот зависит от температурного интервала кристаллизации стали. Поэтому с увеличением содержания углерода свыше $\sim 0,2\%$ пористость возрастает, а объем усадочной раковины уменьшается.

Горячеломкость имеет максимальное значение для низкоуглеродистых сталей с $0,16-0,20\% \text{ C}$, что объясняется δ - γ превращением, происходящим с изменением объема, и большим $\Delta t_{\text{кр}}$. В интервале концентраций $0,3-0,6\% \text{ C}$ горячеломкость изменяется незначительно, а затем постепенно возрастает.

В углеродистых сталях возможны все виды ликвации, но чаще других отмечается зональная ликвация. Главными ликвирующими элементами являются сера, углерод и фосфор. Особенно сильно осевая зональная ликвация проявляется в толстостенных отливках.

Литейные свойства стали значительно хуже, чем у чугуна и других литейных сплавов. Более высокая усадка, худшая жидкотекучесть и заполняемость являются причинами многих литейных пороков. Низкоуглеродистая сталь характеризуется повышенной склонностью к образованию горячих трещин, более высокой температурой плавления и вследствие этого увеличенным пригаром и окисляемостью. Высокоуглеродистые стали имеют более высокую практическую жидкотекучесть, менее склонны к образованию горячих трещин, но пониженные теплопроводность и пластичность приводят к возникновению внутренних напряжений. Углеродистые стали применяют для литья арматуры (25Л), корпусов турбомашин и станин, различных деталей машиностроения (35Л), зубчатых колес и деталей с повышенной износостойкостью, достигаемой поверхностной закалкой (45Л–55Л), валков горячей прокатки (50Л).

5.1.3 Взаимодействие железа с легирующими элементами в углеродистых сталях

В легированные стали вводится различное количество легирующих элементов (ЛЭ). По их содержанию стали подразделяют на три группы:

- 1 - низколегированные (до $2,5\% \text{ ЛЭ}$);
- 2 - среднелегированные ($2,5-10\% \text{ ЛЭ}$);
- 3 - высоколегированные (свыше $10\% \text{ ЛЭ}$, причем содержание одного из ЛЭ не менее 8%).

Название стали обычно определяется названием основных легирующих элементов: хромистая, марганцевая, хромоникелевая сталь и т.д.

Взаимодействие железа с легирующими элементами определяется двумя важными обстоятельствами.

1. Как переходный металл железо образует со своими ближайшими соседями Cr, V, Ni, Co, Mn, Jg, Pt системы с неограниченной растворимостью в твердом состоянии.

Со многими другими элементами железо образует ограниченные твердые растворы и металлидные фазы.

2. Наличие двух полиморфных превращений приводит к большому разнообразию возможных диаграмм состояния «железо–ЛЭ». В основу классификации ЛЭ положено их влияние на положение точек полиморфных превращений и устойчивость фаз – феррита и аустенита. С этих позиций все элементы разделены на две группы: ферритостабилизаторы и аустенитостабилизаторы. Ферритостабилизаторы повышают устойчивость α - и β -феррита (рисунок 5.3, блок 7). Это изоморфные ферриту элементы Cr, V, W, Mo, Ti, а также Al, Si, Be, Ge, As, Sn, Sb. Аустенитостабилизаторы оказывают противоположное влияние, расширяя область устойчивости аустенита к более низкой температуре.

К ним относятся изоморфные аустениту элементы Ni, Co, Mn, Cu, Ag, а также углерод и азот. Характер влияния элементов на устойчивость фаз зависит от электронного строения их атомов.

Большинство легирующих элементов (переходных металлов) имеют высокое сродство к углероду и азоту; они образуют различные карбидные, а также карбонитридные фазы и называются карбидообразующими элементами. По возрастанию карбидообразующей способности элементы можно расположить в такой последовательности: Al, Co, Ni, Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti. Элементы, расположенные левее железа, в сплавах Fe–C карбидов не образуют. Остальные элементы могут образовывать либо комплексные карбиды – легированный цементит $(FeMe)_3C$, либо самостоятельные специальные карбиды типа Me_xC_y и карбонитриды. В литых конструкционных сталях упрочнение специальными карбидами не играет серьезной роли, но в некоторых жаропрочных сталях специальные карбиды являются главными упрочнителями.

При высоких концентрациях легирующих элементов (свыше 10–15%) в сталях могут образовываться интерметаллиды – химические соединения металлов, что повышает твердость и снижает пластичность.

Влияние легирующих элементов на механические свойства стали определяется их взаимодействием с железом и сплавами системы Fe–C. Растворное упрочнение феррита зависит от различия размеров и электронного строения атомов железа и легирующего элемента.

Слабыми упрочнителями феррита являются металлы с ОЦК-решеткой, образующие с α -Fe неограниченные твердые растворы (Cr и V). Сильнее упрочняют феррит металлы с ГЦК-решеткой (Ni, Co) или ограниченно растворимые в железе металлы с ОЦК-решеткой (W, Mo, Nb, Ti). Наиболее сильное упрочнение дают элементы, имеющие сложную кристаллическую решетку (Mn, Si) или значительно отличающиеся от железа электронным строением атомов (Al, Be, P).

Растворное упрочнение ограничено используется в сталях перлитного класса (в основном введением небольших добавок Si, Mn, Cr и Ni). Более широко оно применяется в аустенитных и ферритных сталях, где основой структуры является твердый раствор.

Основной способ упрочнения конструкционных легированных сталей – это термическая обработка. Использование легированных сталей без термической обработки нецелесообразно, так как не удастся полностью реализовать положительное влияние легирующих элементов. Типичная термическая обработка конструкционных легированных сталей заключается в закалке с последующим низким, средним или высоким отпуском. При этом можно получить различную структуру – мартенсит, троостит или сорбит, обеспечивающую желаемый комплекс свойств. Мартенсит обеспечивает повышенную твердость и прочность при резком снижении пластичности, сорбит – меньшую прочность, но хорошие пластические свойства.

Маркировка легированных сталей производится системой букв и цифр. Число в начале маркировки указывает содержание углерода в сотых долях процента, последующие буквы обозначают легирующие элементы. Многие элементы обозначают по первой букве русского названия: А – азот, В – вольфрам, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, Х – хром, Ц – цирконий, а также по букве, содержащейся в названии элемента: Б – ниобий, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, Р – бор, Ю – алюминий. Используются и другие обозначения: С – кремний (силициум), Ф – ванадий. Буква Л в конце маркировки обозначает литейную сталь. Число, стоящее за буквой, указывает содержание элемента в процентах. Если число опущено, то концентрация элемента <1%.

5.2 Легированные конструкционные литейные стали

Легирование литейных сталей осуществляется главным образом, исходя из требований по механическим или специальным служебным свойствам. Литейные свойства низколегированных сталей практически совпадают с литейными свойствами углеродистых сталей при соответствующем содержании углерода. У средне- и высоколегированных сталей эти свойства, как правило, хуже, чем у углеродистых сталей.

Различные элементы влияют на свойства сталей следующим образом.

Кремний при содержании до 0,4–0,5% действует как раскислитель и положительно влияет на литейные свойства. Он повышает жидкотекучесть и снижает горячеломкость стали; увеличивает плотность отливки и немного линейную усадку. При содержании кремния свыше ~0,5% жидкотекучести снижается, а горячеломкость возрастает; ухудшается также качество первичной структуры.

Марганец до 1% также действует главным образом как раскислитель и улучшает литейные свойства. При концентрации марганца свыше 1% возрастает горячеломкость стали, так как вследствие уменьшения теплопроводности увеличиваются литейно-термические напряжения. Минимальный объем усадочной раковины фиксируется при 1,2% Мп.

Хром в количестве 1–2% несколько увеличивает практическую жидкотекучесть стали но условно – истинная жидкотекучесть снижается вследствие увеличения склонности стали к пленообразованию. Небольшие добавки хрома улучшают трещиностойчивость, но при добавках свыше 0,8% возрастает склонность к образованию крупнозернистой структуры и горячеломкость стали. Объем концентрированной усадочной раковины и суммарная объемная усадка заметно возрастают с увеличением содержания хрома до ~5%.

Никель в количестве до 3,5% повышает, жидкотекучесть стали увеличивает суммарную усадку и объем усадочной раковины в прибыли, а также снижает теплопроводность стали, понижает ее трещиностойчивость в такой же мере, как хром.

Медь существенно улучшает жидкотекучесть стали и при увеличении ее содержания от 0,1 до 3% жидкотекучесть низкоуглеродистой стали возрастает от 870 до 1300 мм. Горячеломкость стали при введении меди изменяется незначительно, несколько увеличивается объем усадочной раковины, линейная усадка практически не изменяется.

Вследствие этого медь является ценным легирующим элементом в литейных сталях.

Ванадий, молибден и вольфрам при малом содержании способствуют улучшению литейных свойств сталей, но при возрастании их содержания до ~1% жидкотекучесть и трещиностойчивость снижаются.

Кобальт незначительно улучшает жидкотекучесть и иногда увеличивает усадочную пористость.

Алюминий и титан являются сильными раскислителями. Поэтому их влияние на литейные свойства стали носит сложный характер. Для получения хорошей жидкотекучести и трещиностойчивости оптимальными являются небольшие добавки алюминия (0,05–0,1%) или титана (~0,15%). Увеличение содержания элементов до 0,5–1% приводит к возрастанию горячеломкости и пористости отливок, жидкотекучесть понижается. Алюминий и титан значительно повышают склонность стали к пленообразованию. При открытой плавке стали с 0,5% Ti на поверхности образуется сплошная пленка его окислов. Небольшие добавки титана и алюминия повышают плотность стали, способствуют

измельчению первичной структуры, так как химические соединения Al_2O_3 , TiC, TiN в дисперсном состоянии играют роль модификаторов I рода.

Легированные конструкционные литейные стали содержат по 0,5–1,5% основных легирующих элементов – Cr, Ni, Si, Mn, Cu (таблицы 5.2-5.3).

Таблица 5.2 - Средний химический состав легированных сталей (ГОСТ 977-75)

Марка стали	Среднее содержание, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V	Mo
20ГЛ	0,20	1,4	0,3	–	–	–	–	–
35ГЛ	0,35	1,4	0,3	–				
30ГСЛ	0,30	1,3	0,7	–				
20ФЛ	0,20	0,9	0,3	–		–	0,12	–
45ФЛ	0,45	0,7	0,3				0,15	
40ХЛ	0,40	0,7	0,3	1,0	1,5	–	–	0,25
35ХМЛ	0,35	0,7	0,3	1,0				0,25
30ХНМЛ	0,30	0,7	0,3	1,5				
35ХГСЛ	0,35	1,2	0,7	0,8	–	–	0,12	0,25
23ХГС2МФЛ	0,23	0,7	1,9	0,9				
20ДХЛ	0,12	0,6	0,3	1,0	1,3-1,6	1,5	0,10	0,25
08ГДНФЛ	<0,1	0,8	0,3	1,5		1,0	0,12	
12ДХН1МФЛ	0,12	0,4	0,3			0,5		

Таблица 5.3 - Механические свойства легированных сталей (ГОСТ 977–75)

Марка стали	Температура, °С		Механические свойства, не менее			
	закалки	отпуска	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	a_n Дж/см ²
20ГЛ	(890)	630	550	300	18	0,5
35ГЛ	(890)	630	550	300	12	0,3
45ГЛ	860	630	600	350	14	0,5
30ГСЛ	930	610	650	400	14	0,5
20ФЛ	(890)	630	550	300	18	0,5
45ФЛ	860	630	700	500	12	0,35
40ХЛ	860	630	650	500	12	0,4
35ХМЛ	870	630	700	550	12	0,4
30ХНМЛ	870	630	800	650	10	0,4
30ХГСЛ	875	650	800	600	10	0,4
23ХГС2МФЛ	990	220	1300	1100	6	0,4
20ДХЛ	(880)	580	500	400	12	0,3
08ГДНФЛ	(930)	620	450	350	18	0,5
12ДХН1МФЛ	900	530	1000	750	10	0,3

Примечание. В скобках указана температура нормализации.

Концентрация углерода обычно не превышает 0,35–0,40% (во избежание сильного снижения пластичности). Для улучшения технологических свойств, измельчения зерна и повышения ударной вязкости в стали вводят добавки Mo, V (0,05–0,3%) и Ti (0,05–0,1%). При легировании в этих пределах сталь имеет перлитную структуру, а в нормализованном состоянии – феррито-перлитную. Химический состав и механические свойства

некоторых конструкционных легированных сталей приведены в таблицах. По содержанию основных легирующих элементов стали можно условно разбить на несколько групп. В пределах каждой группы с увеличением суммы легирующих элементов происходит значительное возрастание σ_B и σ_T (а также отношения σ_T/σ_B) при некотором снижении пластичности.

Для легированных конструкционных сталей применяют три основных варианта термической обработки.

1. Нормализация с высоким отпуском – наиболее простая термическая обработка, не обеспечивающая оптимального комплекса свойств.

2. Закалка в масле с высоким отпуском (термоулучшение) обеспечивает наилучшее сочетание прочности и пластичности.

3. Закалка с низким отпуском обеспечивает наиболее высокую прочность при снижении пластичности.

Марганцевые стали (20ГЛ, 30ГЛ и др.) содержат 1–2% Mn и 0,2–0,4% C. Они относятся к наиболее дешевым легированным сталям, обладают более высокой прочностью, ударной вязкостью и прокаливаемостью, чем углеродистые. Поэтому из них изготавливают отливки, работающих в сложных условиях ударно-абразивного износа (детали дробилок, мельниц, бронеплиты, а также в машиностроении – валы, траверсы, зубчатые колеса).

Хромистые стали (40ХЛ и др.) имеют более высокую прочность и прокаливаемость, чем углеродистые (при той же пластичности). Из них изготавливают толстостенные отливки (60–80 мм) для машиностроения. Литейные свойства этих сталей незначительно отличаются от литейных свойств углеродистых сталей с соответствующим содержанием углерода. Введение хрома способствует образованию крупнозернистой структуры, поэтому в хромистые стали вводят небольшие добавки молибдена (35ХМЛ), улучшающие структуру и свойства литых сталей. Кроме того, добавки молибдена уничтожают отпускную хрупкость сталей при термической обработке.

Сталь хромансил (30ХГСЛ) комплексно легирована добавками хрома, кремния и марганца, что придает ей высокую прочность и прокаливаемость. Она применяется для отливки ответственных деталей с максимальной толщиной стенки до 80–100 мм, работающих в условиях ударно-абразивного износа (рычаги, валы, толкатели, шестерни). Сталь подвергается термической обработке – закалке (или нормализации) с последующим средним или высоким отпуском. Она обладает хорошей жидкотекучестью, позволяющей получать отливки с минимальной толщиной стенки до 4 мм, однако отливки отличаются крупнозернистостью и склонны к образованию трещин и короблению. Для улучшения структуры и технологических свойств в сталь часто вводят небольшие добавки молибдена, титана и ванадия.

Хромоникелевые стали (30ХНМЛ и др.) по комплексу механических свойств занимают одно из первых мест среди конструкционных сталей. В машиностроении они используются для изготовления особо ответственных высоконагруженных деталей. Совместное влияние хрома и никеля проявляется в измельчении зерна при кристаллизации и фазовой перекристаллизации, в значительном увеличении прокаливаемости, что делает сталь пригодной для изготовления крупногабаритных отливок. Никель в легирующем комплексе обеспечивает сочетание высокой прочности с хорошей пластичностью и ударной вязкостью. Для уничтожения отпускной хрупкости в сталь необходимо вводить ~0,3% Mo. Термическая обработка состоит из нескольких последовательных операций: гомогенизации, нормализации, закалки, высокого отпуска. Она позволяет получить равномерные свойства по всему сечению толстостенных отливок.

Хром и никель увеличивают вязкость жидкой стали, однако жидкотекучесть по сравнению с углеродистой сталью уменьшается незначительно. Доперлитная свободная усадка у Cr–Ni–Mo стали значительно выше, чем у углеродистой, и достигает ~2%. Сталь склонна к образованию горячих трещин и межкристаллического «камневидного» излома. К недостатку стали следует отнести также высокую стоимость за счет содержания дефицитного никеля. Поэтому во всех возможных случаях хромоникелевую сталь следует заменять более дешевой хромомарганцевой сталью.

Медистые стали (20ДХЛ, 08ГДНФЛ и др.) обычно содержат 0,5–2,0% Cu, а также добавки хрома, никеля и марганца. Стали, легированные медью, подвержены дисперсионному твердению (после закалки), в результате чего повышается прочность и упругость, обеспечивается равномерность свойств в толстых и тонких сечениях отливки. Так как стали обладают достаточно хорошей жидкотекучестью и трещиноустойчивостью, они могут быть использованы для ответственных крупногабаритных фасонных отливок в судостроении и турбостроении. При последующем монтаже конструкций эти отливки часто подвергаются сварке.

Многие конструкционные легированные стали успешно модифицируют бором, кальцием, церием и другими РЗМ. В результате улучшается комплекс механических и литейных свойств.

Графитизированная сталь занимает особое положение по структуре и свойствам. Она содержит 0,9–1,5% C, 1,0–1,4% Si и 0,5% Mn. Повышенное содержание углерода и кремния обеспечивает хорошую жидкотекучесть и другие литейные свойства. В литом состоянии структура стали представляет собой перлит и вторичные выделения цементита; весь углерод находится в связанном состоянии. Во время термической обработки (отжиг с нагревом до 900 °С и последующим медленным охлаждением в интервале температур 800–700 °С) часть цементита претерпевает распад с образованием графитных выделений. В результате микроструктура состоит из перлитной матрицы, в которой связано ~0,8% C, и выделений графита. Графитизированная сталь хорошо обрабатывается резанием, имеет повышенные антифрикционные свойства. Механические свойства стали ($\sigma_b = 800$ МПа, $\sigma_t = 500$ МПа, $b = 10\%$), поэтому из неё изготавливают отливки, работающие в условиях ударно-абразивного износа, при отсутствии ударных нагрузок (втулки, вкладыши, матрицы).

5.3 Высоколегированные литейные стали со специальными свойствами

Эта группа сталей отличается чрезвычайным разнообразием составов и свойств. Согласно ГОСТ 2176–77 высоколегированные стали по структуре подразделяют на шесть классов:

- 1 - мартенситный;
- 2 - мартенситно-ферритный;
- 3 - ферритный;
- 4 - аустенитно-мартенситный;
- 5 - аустенитно-ферритный;
- 6 - аустенитный.

Смена классов происходит по мере увеличения степени легированности стали. На практике чаще пользуются классификацией сталей по назначению (основным рабочим свойствам): износостойкая, коррозионно-стойкая, кислотостойкая, жаростойкая и жаропрочная сталь. Химический состав некоторых сталей этих групп приведен в таблице 5.4.

Хромистые коррозионно-стойкие и жаростойкие стали с мартенситной и ферритной структурой содержат различное количество хрома (от 11–13 до 27–30%). Хром обеспечивает высокую коррозионную стойкость и жаростойкость, он является основным легирующим элементом для этих сталей. Коррозионная стойкость в сплавах Fe–Cr скачкообразно изменяется по мере увеличения содержания хрома. Такими пороговыми значениями являются концентрации хрома 11,7% и 23,4%. Соответственно стали с 13–18% Cr используются как коррозионно-стойкие, а стали с 25–30% Cr как жаростойкие. Структура сталей определяется соотношением концентраций хрома и углерода.

Низкоуглеродистая хромистая сталь с 13% Cr (20X13Л) относится к мартенситному классу. После закалки она имеет $\sigma_b = 630$ МПа, $\sigma_T = 450$ МПа при относительном удлинении $\delta = 15\%$. Сталь применяется для литья деталей, подвергающихся ударным нагрузкам (клапаны, турбинные лопатки, запорная арматуры).

Низкоуглеродистые стали с 18–25% Cr (12X18ТЛ, 15X25ТЛ) относятся к ферритному классу. При нагреве и охлаждении в них не происходит фазовых превращений, поэтому стали не подвергают упрочняющей термической обработке. Ферритный твердый раствор не позволяет получить высокую прочность ($\sigma_b = 250$ –300 МПа), но обладает хорошей пластичностью ($\delta = 20\%$). Стали предназначены для изготовления малонагруженных отливок в химической промышленности и отливок печной арматуры, работающей при температуре до 900–1100°C. Добавка титана в этих сталях связывает углерод и повышает стойкость против межкристаллитной коррозии.

Для получения высокой твердости и износостойкости в хромистых сталях увеличивают содержание углерода до 0,5–1,5% (стали типа X28Л с ферритно-карбидной структурой).

Хромоникелевые коррозионно-стойкие мартенситные стали содержат Cr = 13–18%, Ni = 1–4%. Это количество никеля недостаточно для формирования стабильного аустенита, после закалки и отпуска формируется мартенсит.

Сталь 10X14НДЛ дополнительно легирована медью, что повышает ее коррозионную стойкость в морской воде и улучшает свариваемость. Механические свойства стали: $\sigma_b = 600$ МПа, $\sigma_T = 450$ МПа, $\delta = 15\%$. Сталь предназначена для ответственных отливок в судостроении (гребных винтов и др.). Увеличение содержания никеля до 4% в стали 09X16Н4БЛ приводит к резкому возрастанию механических свойств: $\sigma_b = 950$ МПа, $\sigma_T = 800$ МПа, $\delta = 10\%$. Эта сталь предназначена для деталей повышенной прочности, работающих при температуре до 500 °C.

В рассматриваемых сталях хром и никель снижают температуру ликвидуса и солидуса на 25–30 °C. В связи с этим практическая жидкотекучесть стали увеличивается. Истинная жидкотекучесть вначале уменьшается (при содержании хрома до 5–8%), а затем возрастает. В результате жидкотекучесть высокохромистых сталей выше, чем жидкотекучесть углеродистых сталей с тем же содержанием углерода. Жидкая хромистая сталь склонна к пленообразованию, что вызывает повышение вязкости. Поэтому для улучшения заполняемости необходимо при литье увеличить перегрев ее по сравнению с углеродистой сталью.

В низкоуглеродистых хромистых сталях и сталях с небольшими добавками никеля кристаллизация начинается с выделения обогащенного хромом δ -феррита. Первичные выделения достигают крупных размеров, особенно в условиях перегрева стали перед заливкой или в крупногабаритных, медленно охлаждающихся отливках. При охлаждении β -феррит не претерпевает фазовую перекристаллизацию и в отливках сохраняется грубозернистая транскристаллическая структура с пониженными механическими свойствами. Эти особенности структурообразования в сочетании с низкой теплопроводностью

(вдвое ниже, чем у углеродистой стали) способствуют повышению склонности ферритной и мартенситной стали к образованию горячих и холодных трещин. Поэтому большое значение приобретает модифицирование стали 0,1% Се и 0,1–0,15% N с целью измельчения первичной структуры. Азот является эффективной добавкой для устранения транскристаллизации.

Хромоникелевые коррозионно-стойкие и жаростойкие стали аустенитного класса содержат более 8–10% Ni, что при ~0,1% С и ~18% Cr обеспечивает в закаленном состоянии получение стабильной аустенитной структуры. Выделение карбидов Cr₄C в процессе эксплуатации или при сварке приводит к резкому снижению пластичности, а также уменьшает коррозионную стойкость, так как часть хрома выводится из твердого раствора. Добавка титана в количестве %Ti = 6-(%С – 0,02) или ниобия связывает углерод в более стойкие карбиды TiC, сохраняет хром в твердом растворе и повышает стойкость стали против межкристаллитной коррозии (сталь 12X18H9ТЛ). Дальнейшее повышение коррозионной стойкости достигается дополнительным легированием стали медью или молибденом. В последнем случае для сохранения аустенитной структуры следует увеличить содержание никеля (сталь 12X18H12M3ТЛ). Это необходимо также при увеличении содержания хрома в целях повышения коррозионной стойкости и жаростойкости (сталь 18X25H19СЛ). Если же при 25% Cr содержание никеля сохраняется на уровне 10–12%, то структура стали становится двухфазной аустенитно-ферритной (сталь 40X24H12СЛ).

Для сталей аустенитного класса применяют термическую обработку: закалка от 1050–1100 °С или нормализация при той же температуре.

Характерной особенностью механических свойств сталей аустенитного класса является невысокая прочность ($\sigma_b = 450-500$ МПа) и низкий предел текучести ($\sigma_T = 180-250$ МПа) при очень хорошей пластичности ($\delta = 25-7-35\%$). Стали широко применяют в химической промышленности для литья различной арматуры (12X18H9ТЛ), для деталей паровых и газотурбинных установок – лопаток, венцов и т.п. (18X25H19СЛ), а также для жаростойкой печной арматуры.

Температуры солидуса и ликвидуса у сталей содержащих, например, 18% Cr, 8% Ni и 0,1% С составляют соответственно 1400 и 1470 °С, т.е. на 40–50 °С ниже, чем у углеродистых сталей. Поэтому практическая жидкотекучесть оказывается достаточно высокой. Ее улучшают также добавки кремния (до 1,5%) и марганца. Условно-истинная жидкотекучесть такая же, как у углеродистой стали с 0,15% С. Стали содержащие 18% Cr и 8% Ni склонны к пленообразованию, в связи с чем, их температуру заливки повышают до 1580–1650 °С. Объем усадочной раковины составляет 3,6%, т.е. в 1,5 раза больше, чем у углеродистой стали; затрудненная линейная усадка находится в пределах 1,6–2% (у аустенитно-ферритных сталей она составляет 1,4–1,5%).

Стали аустенитного класса не склонны к образованию горячих или холодных трещин, из-за отсутствия фазовых превращений, высокой пластичности и низкого предел текучести. Они очень чувствительны к изменению температурных условий литья и склонны к образованию грубозернистой дендритной структуры (рисунок 5.3 , б). Ее невозможно исправить термической обработкой, так как в стали не происходит фазовая перекристаллизация. Для улучшения структуры используется модифицирование введением 0,3% Се, 0,1% Са, 0,06–0,1% В, а также добавками Ti и Zr.

Хромоникелевые жаропрочные стали аустенитного класса имеют наиболее сложный легирующий комплекс. Из них изготавливают турбинные лопатки, роторы и другие детали газотурбинных двигателей длительно работающие при температурах до 800 °С.

В стали 15X18H22B6M2Л высокая жаропрочность обеспечивается растворным упрочнением путем введения добавок вольфрама и молибдена.

В стали 08X17H34B5T3Ю2Л жаропрочность обеспечивается дисперсионным твердением, так как в высоколегированном твердом растворе образуются дисперсные упрочняющие частицы интерметаллидов Ni_3Ti и Ni_3Al . Стали обладают удовлетворительными литейными свойствами при условии вакуумной плавки и литья в подогретые коундовые формы.

Хромокремнистая сталь мартенситного класса (40X9C2Л) обладает повышенной износостойкостью и применяется для нагруженных деталей (клапанов моторов, крепежных деталей), длительно работающих при температурах до 700 °С. Важную роль в упрочнении стали играют углерод и кремний.

Высокомарганцевая износостойкая сталь аустенитного класса 110Г13Л (Гатфильда) обладает уникальным комплексом свойств. В закаленном состоянии она имеет аустенитную структуру с низкой твердостью (НВ 200) и высокой вязкостью, что обеспечивает хорошее сопротивление ударным нагрузкам. Под их воздействием марганцевый аустенит быстро наклепывается, и твердость повышается до НВ 600, поэтому она очень плохо обрабатывается резанием. В результате резко возрастает износостойкость в самых тяжелых условиях абразивного износа. Прочность стали 600–800 МПа; ударная вязкость 0,14–0,20 МДж/м². Высокомарганцевая сталь обладает хорошей жидкотекучестью и относительно низкой температурой плавления (1330–1370 °С), её линейная усадка составляет 2,5–3%.

Сталь имеет повышенную склонность к образованию различных литейных дефектов: трещин, раковин и транскристаллической структуры. Для измельчения литой структуры вводят титан (0,4–0,8%) или цирконий (0,1–0,2%).

Таблица 5.4 – Средний химический состав высоколегированных сталей

Марка стали	Класс по структуре	Среднее содержание, %						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Другие элементы
Хромистые коррозионностойкие стали								
20X13Л	М	0,2	0,5	0,6	13	-	-	-
12X18ТЛ	Ф	0,1	0,5	0,6	18	-	-	0,6 Ti
15X25ТЛ	Ф	0,15	0,8	0,5	25	-	-	0,6 Ti
Хромоникелевые коррозионностойкие стали								
10X14НДЛ	М	<0,1	0,3	0,4	14	1,4	-	1,4Cu
09X16H4БЛ	М	0,09	0,4	0,4	16	4,0	-	0,1Nb
Хромоникелевые коррозионностойкие и жаростойкие стали								
12X18H9ТЛ	А	<0,12	0,6	1,5	18	9	-	0,8 Ti
12X18H12M3ТЛ	А	<0,12	0,6	1,5	18	12	3,5	0,8 Ti
18X25H19СЛ	А	<0,18	1,4	1,1	25	19	<0,2	<0,4W; 0,2Ti
40X24H12СЛ	А-Ф	<0,4	1,0	0,5	24	12	-	-
Хромоникелевые жаропрочные стали								
15X18H22B6M2Л	А	0,15	0,5	0,5	18	22	2,5	6W; 0,01B
08X17H34B5T3Ю2Л	А	<0,08	0,5	0,5	17	34	-	5 W; 3 Ti
Хромокремнистая износостойкая сталь								
40X9C2Л	М	0,4	0,5	0,5	9	-	-	-
Хромомарганцевая износостойкая сталь								
110Г13Л	А	1,1	13	13	<1,0	<1,0	-	-

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Как классифицируют и маркируют углеродистые стали?
- 2 Как классифицируют и маркируют легированные стали?
- 3 Какие факторы влияют на свойства углеродистых сталей?
- 4 Как влияют легирующие элементы на свойства легированных сталей?
- 5 Как изменяется микроструктура при фазовой перекристаллизации стали?
- 6 Какими особенными свойствами обладает высокомарганцевая сталь (Гатфильда)?

стоящие из металлошихты, кокса и флюса. Чугун плавится за счет теплоты, выделяющейся от сгорания кокса и стекает в нижнюю часть вагранки, называемую горном, и скапливается там, либо непрерывно уходит в копильник, где собирается определенная порция для выпуска на заливку.

Пламенные печи ПЛС и ПЛВ работают периодически. В рабочее пространство загружают твердую шихту или заливают жидкий металл из вагранки, включают горелки или форсунки и ведут плавку.

Индукционные печи (ИТП), получающие все более широкое распространение, просты по конструкции. Металл находится в тигле. Шихту обычно загружают в так называемое «болото», т.е. в жидкий металл от предыдущей плавки (~1/3 массы плавки). Индукционные токи наводятся в металле индуктором 2, охватывающим тигель в виде обмотки. Выпуск готового чугуна осуществляется путем наклона печи.

Дуговые печи ДСП загружают шихтой сверху, свод 4 при этом отводится в сторону, шихта, а затем жидкий металл находятся в ванне 2. Расплавление производится при помощи дуговых разрядов, создаваемых электродами 3. Выпуск готового чугуна осуществляется путем наклона печи по желобу 2.

В качестве печи ожидания наиболее целесообразно применять ИКП, так как они имеют более высокий КПД по сравнению с другими электропечами. Генерация теплоты в этих печах производится в канале 1, заполненном жидким металлом 3 и охватывающем подобно обмотке трансформатора сердечник 1 с первичной обмоткой.

В АРУ обычно также используется индукционный каналный источник генерации теплоты (как и в ИКП). Металл 1, находясь в канале 2, постоянно подогревается. Для автоматической разливки используют давление на металл сжатым воздухом через отверстие 3 в своде. При этом уровень в основной емкости понижается, и металл через отверстия 4 выжимается из АРУ и поступает в литейную форму 5.

6.3 Общая характеристика процесса плавки чугуна

В вагранках операции, характерные для любого процесса плавки, реализуются в соответствующих зонах. В зоне нагрева горячие газы нагревают металл, который при этом вступает во взаимодействие с газовой фазой – происходит его окисление; кокс, нагреваясь, теряет летучие вещества и т.д. Операция плавления характеризуется переходом металла из твердого состояния в жидкое и сложным взаимодействием фаз в этой зоне. В зоне перегрева жидкий металл и образующийся жидкий шлак реагирует между собой, с газовой фазой, с коксом, а также с футеровкой печи. В зоне накопления жидкий металл реагирует со шлаком и коксом. В результате всех взаимодействий рабочий вход (шихта) преобразуется в полезный выход – жидкий чугун.

При плавке чугуна в электропечах процесс подразделяют на два основных периода: 1) нагрева и расплавления; 2) перегрева и доводки.

Реализация операций плавки в индукционной печи. Вслед за операцией загрузки следуют операции нагрева и расплавления, осуществляемые одновременно. Шихту обычно загружают в остаток жидкого металла от предыдущей плавки, поэтому нагрев и расплавление связаны с взаимодействием жидкого металла с твердым. Газовая фаза, присутствующая при этом, окисляет металл. В период перегрева весь металл жидкий и взаимодействует со шлаком и футеровкой печи. В итоге процесса получают жидкий сплав (выход системы). Модель выхода включает температуру чугуна, его химический состав и свойства: литейные, достаточные для получения отливки требуемого качества; механические, требуемые по ГОСТу для данной марки чугуна, и эксплуатационные

свойства по ТУ на данную отливку (герметичность при гидроиспытаниях и т. п.). Модель воздействия включает корректировку по химическому составу, перегрев до требуемой температуры, выпечную обработку, модифицирование на выпуске и корректировку состава шихты. Кроме того, во время плавки требуется соблюдение определенных условий ее ведения: последовательность загрузки, режим подачи энергии и т. п. Например, при плавке в вагранке необходимо следить за правильностью загрузки холостой колоши кокса (определенная высота колоши и крупность кокса), за количеством и температурой дутья и т. п.

Модель воздействия неодинакова для различных плавильных агрегатов. Одни агрегаты позволяют широко воздействовать на процесс, другие нет. Например, при плавке в электропечах доводка по химическому составу и температуре осуществляется значительно эффективнее, чем при плавке в вагранке.

Во время плавки формирование химического состава чугуна происходит в результате взаимодействия фаз.

6.4 Плавка чугуна в вагранках

Основные типы вагранок. В настоящее время самым распространенным чугуноплавильным агрегатом является вагранка, простота конструкции которой обеспечила ей широкое распространение во всем мире. Однако открытые коксовые вагранки выбрасывают в атмосферу большое количество вредных газов и пыли, а также не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к температуре и качеству чугуна при производстве сложных отливок. В связи с этим вагранки оснащают устройствами для дожигания и очистки отходящих газов и подогрева воздушного дутья.

Характерной особенностью современной вагранки является доменный профиль шахты, который существенно улучшает газодинамику и теплообмен в вагранке и удобен для наружного поливного охлаждения. Фурмы выполняются выдвинутыми водоохлаждаемыми, быстросменными, по типу фурм доменных печей. Несмотря на широкое применение водяного охлаждения, практически все вагранки имеют огнеупорную футеровку; в большинстве случаев эта футеровка выполняется из шамотных огнеупорных изделий. Классификация вагранок представлена на рисунке 6.2.

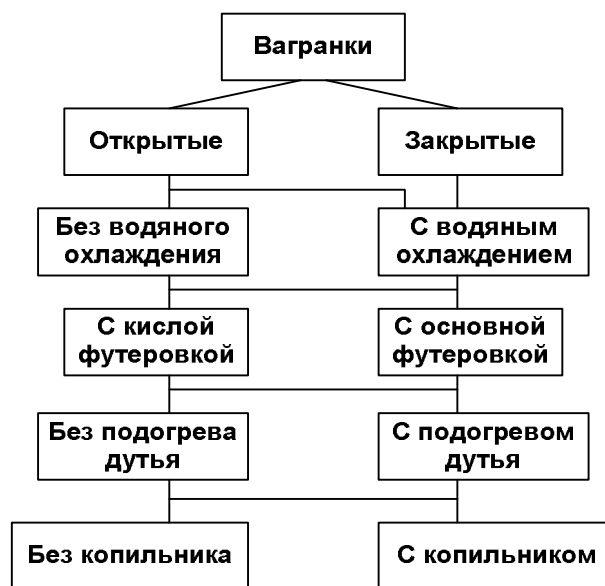


Рисунок 6.2 – Классификация вагранок

Для футеровки остальных зон используют изделия ШБВ и ПБВ. Кроме кислой футеровки, которая выполняется из шамотных и полукислых огнеупоров, вагранки могут иметь основную футеровку. Она используется лишь в тех случаях, когда надо получить из вагранки малосернистый чугун за счет применения основных шлаков. Работают эти вагранки обычно на горячем дутье.

Для футеровки горна вагранок с водяным охлаждением, имеющих длительный цикл работы, применяют углеродистые огнеупоры в виде блоков или набивной углеродистой массы.

Вагранки с водяным охлаждением плавильного пояса с горном из углеродистых материалов работают, как правило, на горячем дутье и имеют высокие технико-экономические показатели.

Накопление металла может осуществляться в нижней части вагранки, называемой горном, или в специальном копильнике. В соответствии с этим различают вагранки с копильником и без него (рисунок 6.3).

Кокс в вагранке находится в виде толстого слоя холостой колоши и более тонких слоев рабочих колош. Его горение при подаче воздуха в фурмы определяет физико-химические условия процесса плавки.

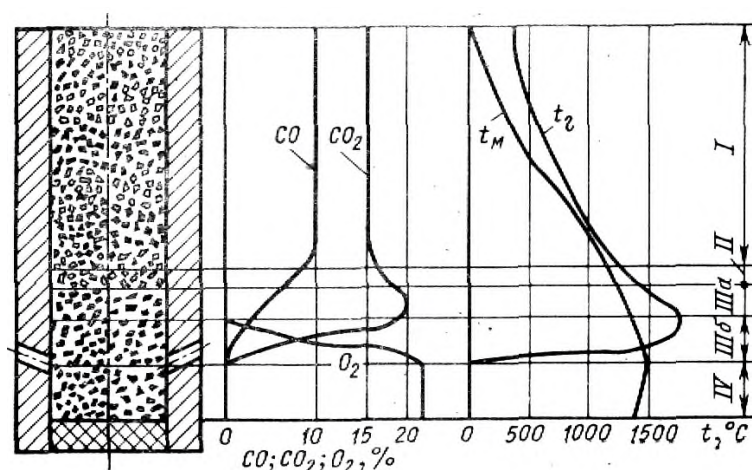
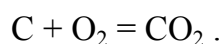
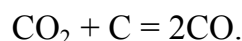


Рисунок 6.3 – Изменение температуры и состава газов по зонам вагранки (t_g и t_M – температуры газов и металла)

В районе фурм кислород подаваемого в вагранку воздуха реагирует с углеродом кокса:



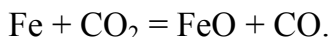
За кислородной зоной холостой колоши следует восстановительная зона, в которой происходит восстановление (восстановление) двуокиси углерода до окиси:



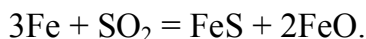
При расходе кокса 10–12% от металлозавалки и подаче воздуха 100–120 м³/(м²·мин) в результате протекания реакций горения и восстановления суммарный коэффициент расхода воздуха $\alpha \approx 0,8$, и ваграночные газы при выходе из холостой колоши содержат 15% CO₂, 10% CO и 75% N₂.

Вагранку подразделяют на четыре зоны.

I. Зона нагрева. Твердые шихтовые материалы реагируют с газовой фазой, атмосфера окислительная, происходит окисление железа по реакции:



На поверхности металлических кусков шихты возможно окисление и других элементов чугуна, металл также насыщается серой из газа:

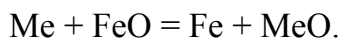


Известняк в этой зоне разлагается по реакции:

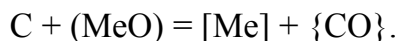


Топливо теряет влагу и летучие вещества.

II. Зона плавления. Металлические компоненты шихты расплавляются. Процессы окисления, насыщения серой и обезуглероживания протекают более интенсивно, чем в зоне I. Происходят вторичные реакции окисления элементов закисью железа FeO, которая, стекая вместе с расплавленным металлом, реагирует с Si, Mn и C по реакциям типа:



III. Зона перегрева. Ее подразделяют на две подзоны IIIa – редуционную зону и IIIб – кислородную зону холостой колоши. В подзоне IIIa протекает реакция восстановления CO₂. Жидкий металл стекает по кускам кокса в виде капель и струек, перегревается, начинаются процессы науглероживания, растворения углерода и серы из кокса и восстановления элементов по реакциям:



В этой зоне начинается шлакообразование.

В подзоне IIIб кокс горит по реакции. Происходит интенсивное окисление элементов по реакциям типа $\text{Me} + 1/2\text{O}_2 = \text{MeO}$, и в первую очередь – железа, закись которого окисляет Si, Mn, C по реакции типа. В этой зоне наблюдается энергичное науглероживание при контакте капель металла с коксом, восстановление элементов по реакциям типа и заканчивается образование шлака.

IV. Зона накопления, т.е. горн. Металл и шлак в этой зоне немного охлаждаются. Металл скапливается в горне и, контактируя с коксом, растворяет углерод, а также серу кокса. Вагранки, в которых накопление металла производится в горне, дают чугун с повышенным содержанием углерода и серы.

В итоге всех физико-химических процессов угорает 15 – 25% Si, 25 – 30% Mn от первоначального их содержания в шихте. Количество углерода и серы в итоге увеличивается.

Угорает некоторое количество железа. Его окислы, окислы кремния и марганца, зола топлива и оплавленная футеровка образуют ваграночный шлак.

6.5 Технология плавки чугуна в вагранке

Технологический цикл работы вагранки включает следующие операции: подготовку вагранки к плавке, розжиг, загрузку и пуск, обслуживание вагранки во время работы, остановку вагранки.

Подготовка вагранки к плавке в основном заключается в ремонте огнеупорной футеровки.

Ремонт может быть капитальным, средним и текущим. При капитальном ремонте заменяется вся огнеупорная футеровка вагранки, при среднем – футеровка в наиболее напряженных местах: зоне плавления, фурменном поясе, переходной летке и других местах, подвергнувшихся значительному разрушению. Текущий ремонт производится после каждой плавки. Его объем определяется длительностью плавки и состоянием футеровки после плавки.

Длительность цикла работы вагранок без водяного охлаждения составляет 8 – 20 ч. При использовании водяного охлаждения длительность работы вагранки может быть доведена до 1 месяца.

Огнеупорная футеровка производится путем кладки шамотного кирпича на растворе, состоящем из 25 – 30% огнеупорной глины, 70 – 75% молотого шамота или 25 – 30% огнеупорной глины и 70 – 75% кварцевого песка. Футеровка вагранок может осуществляться набивкой или торкретированием (напылением). Ремонт футеровки методом торкретирования наиболее прогрессивен, но применяется пока еще редко. Подину вагранки (дно шахты) набивают отработанной смесью, гарью (отбросами из искрогасителя) и некоторым количеством свежих формовочных материалов. После ремонта футеровки, особенно среднего и капитального, необходимо просушить футеровку, в противном случае выделяющиеся пары во время плавки могут повлиять на ход ваграночного процесса и привести к растрескиванию футеровки и преждевременному выходу ее из строя. Сушку лучше всего производить газовыми горелками.

После сушки на подину вагранки укладывают дрова для розжига кокса холостой колоши. Высота холостой колоши является одним из важнейших технологических факторов, от которого зависят производительность вагранки и температура выплавляемого чугуна; она должна быть 1,2–1,5 м над основным рядом фурм. Во время продувки выдувается коксовая пыль и мелочь, кокс разгорается. Можно загружать шихту.

После розжига холостой колоши включают воздуходувку и подают в вагранку воздух; продувку производят в течение 2–3 мин.

Технология плавки в вагранке содержит еще много чисто эмпирических рекомендаций. Например, рекомендуется контролировать правильность выбора высоты холостой колоши по времени появления первых капель чугуна в зоне фурм. Если дутье подают сразу после полной завалки первого столба, то первые капли должны появляться у фурм через 15–20 мин. Если они появились раньше, то высота холостой колоши недостаточна. Для холостой колоши необходимо отбирать крупный кокс с размером кусков 100–150 мм. Загрузка осуществляется в такой последовательности: топливо–флюсы–металл. После небольшой выдержки для прогрева шихты включают подачу воздуха, и начинается процесс плавки.

Топливная рабочая колоша должна иметь слой кокса толщиной 150–200 мм. Расход топлива на топливную колошу составляет 8–18% (обычный расход 10–12%). Например, при толщине слоя кокса 150 мм для вагранки диаметром 700 мм масса топливной колоши составляет 27 кг, а металлической – 270 кг, т. е. приблизительно 1/10 часовой производительности вагранки.

При более интенсивном дутье необходимо давать больше кокса, чтобы не допустить спуска верхнего уровня холостой колоши, так как это может резко снизить температуру чугуна и ухудшить его качество. Избыток топлива в рабочих колошах может вызвать подъем верхнего уровня холостой колоши и замедление плавления. На рабочую колошу кокса дают флюс в количестве 2–3% от массы металлозавалки.

Таблица 6.1– Рекомендуемые массы кокса и металлозавалки в рабочих колошах в зависимости от внутреннего диаметра вагранки

Диамет вагранки в свету, м	Производительность вагранки, т/ч	Масса металлозавалки, кг	Масса (кг) кокса в рабочей колоше при его расходе, %		
			10	12	14
0,5	2	150	15	18	21
0,7	3–4	300	30	36	42
0,9	4–6	500	50	60	70
1,1	7,5–9	700	70	84	98
1,3	9–12	900	90	108	126
1,5	14–17	1360	135	162	189
1,8	18–22	1800	180	216	252
2,1	25–30	2500	250	300	350

Дальнейший ход плавки зависит от правильного соотношения количества подаваемого воздуха и расхода кокса. Количество воздуха, подаваемого в вагранку, обычно оценивается в кубических метрах в минуту на 1 м^2 площади свободного поперечного сечения вагранки. Норма подачи воздуха в вагранку составляет в среднем $100\text{--}130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$, а в отдельных случаях $160\text{--}180 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ при выплавке, например, низкоуглеродистого чугуна.

Во время плавки в вагранке необходимо соблюдать правильность взвешивания и загрузки шихты. Нельзя допускать зависания шихты в шахте вагранки или ее опускания более чем на высоту двух колош ниже завалочного окна.

При плавке должны контролироваться следующие параметры: количество подаваемого воздуха, его давление, температура чугуна. Необходимо следить, чтобы не зашлаковывались фурмы, их следует регулярно очищать. В аварийных случаях для разжижения шлака требуется добавить плавиковый шпат.

При окончании плавки в вагранке останавливают воздухоудовку, выпускают шлак и жидкий чугун, открывают днище вагранки, при этом подина и холостая колоша вываливаются, кокс тушат водой.

Образование шлака и его влияние на ваграночный процесс. Особенности кислого и основного процессов. Шлак является одной из основных фаз, участвующих в металлургическом процессе, его состав и свойства могут оказывать существенное влияние на ход плавки и свойства получаемого металла.

Источниками образования ваграночного шлака служат угар таких элементов, как Si, Mn, Fe, оплавление футеровки, загрязнение шихты (песок и посторонние примеси), зола топлива, флюсы. Всего шлака может быть 5 – 10% от массы металла.

В состав шлака входят CaO, SiO₂, Al₂O₃, MnO, FeO, MgO. Могут входить и оксиды других металлов: Cr₂O₃, TiO₃, V₃O₃, P₂O₆, K₂O₅, Na₂O, а также сульфиды (FeS и др.)

Основные составляющие шлака: кремнезем, окись кальция CaO, глинозем Al₂O₃. Для кислых ваграночных шлаков показатель кислотности составляет 1,2–1,9.

Состав шлака зависит от типа применяемой футеровки, количества и состава флюсов. Различают кислый и основной процессы плавки. При кислом процессе вагранку футеруют шамотом и применяют в качестве флюса известняк в количестве 2–3%. Во время плавки образуется кислый шлак. В его составе преобладает SiO_2 (40–60%), а также содержится 10–20% Al_2O_3 и 10–30% (CaO+MgO).

При основном процессе футеровку выполняют из основных огнеупоров. В качестве флюса добавляют 7–10% известняка. Шлак получается следующего состава: 20–30% SiO_2 , 5–10% Al_2O_3 , 40–50% CaO, 10–15% MgO. В соответствии с общими закономерностями физико-химических процессов элементы, при окислении которых образуются кислые окислы, более интенсивно окисляются при основных шлаках, и наоборот.

Поэтому при основном процессе кремний будет больше окисляться, чем при кислом процессе, а марганец – наоборот. При основном процессе, как следствие, будет больше содержание углерода в полученном чугуне.

Главное преимущество основного процесса заключается в возможности удаления из металла до 40–50% S и 30–40% P.

В основных шлаках имеется свободная окись кальция, которая способствует удалению серы. Десульфурация тем эффективнее, чем выше отношение CaO к SiO_2 в шлаке, выше температура и меньше содержание FeO в шлаке,

Фосфор удаляется тем интенсивнее, чем выше содержание CaO и FeO в шлаке и чем ниже температура.

Тем не менее плавку чугуна в вагранках, как правило, производят при кислых шлаках, так как этот процесс проще, футеровка дешевле. На протекание ваграночного процесса оказывает влияние не только взаимодействие шлака и металла как химических реагентов, но и поведение шлака как жидкой фазы. В зависимости от состава шлак может иметь различную температуру плавления и вязкость.

При высокой вязкости шлака нарушается ваграночный процесс, так как могут образовываться настывы, особенно над фурами, где температура несколько ниже; вязкий шлак плохо разделяется с металлом, поскольку в шлаке могут оставаться включения металла – корольки, а это – безвозвратные потери металла. Вязкость шлака должна быть в пределах 0,3–0,8 Па·с.

6.6 Интенсификация плавки чугуна в вагранках

Для интенсификации плавки чугуна в вагранках применяют подогрев дутья, введение кислорода и используют электроэнергию.

Применение горячего дутья увеличивает температуру газов:

$$t_{\text{г}} = (Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{в}}^{\text{физ}}) / (\sum C_{\text{инг}} V_{\text{инп}}),$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – теплотворная способность топлива;

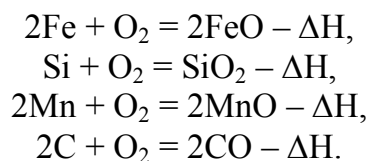
$Q_{\text{в}}^{\text{физ}}$ – физическая теплота, вносимая воздухом;

$\sum C_{\text{инг}} V_{\text{инп}}$ – сумма произведений теплоемкостей и объемов всех компонентов продуктов сгорания.

Высокая температура процесса способствует получению чугуна с более высокой температурой, повышению производительности вагранки и интенсификации физико-химических процессов.

Применение кислорода в дутье также увеличивает t_r и интенсифицирует процесс вследствие уменьшения значения $\sum C_{\text{инт}} V_{\text{инт}}$.

Если кислород вдувают непосредственно в чугуны, например в копильник, то теплота выделяется в результате экзотермических реакций окисления элементов чугуна:



Суммарный тепловой эффект реакции весьма значительный, поэтому температура чугуна повышается.

При применении электроэнергии положительный эффект достигается за счет превращения электрической энергии в тепловую, используемую на подогрев чугуна. Для интенсификации процессов может применяться перегрев чугуна электросопротивлением на желобе, электрошлаковым способом в копильнике или при помощи индуктора на желобе.

6.7 Плавка чугуна в газовых вагранках

Различают четыре типа газовых вагранок: с уступами в шахте, с перемычкой в шахте, с выносной камерой перегрева и с холостой огнеупорной колошей (рисунок 6.4). В вагранках применяется один и тот же принцип перегрева жидкого чугуна при его падении с высоты 1–1,5 диаметра шахты из зоны плавления в бассейн камеры перегрева.

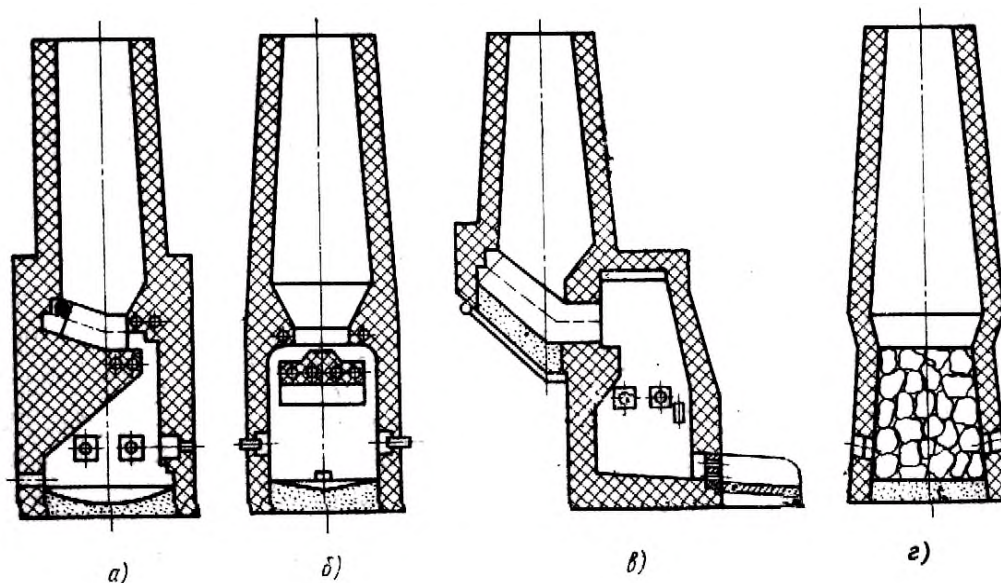
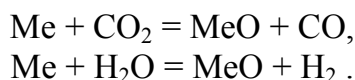


Рисунок 6.4 – Газовые вагранки с уступами (а), перемычкой (б) в шахте, с выносной камерой (в) и холостой колошей (г)

Физико-химические особенности процесса плавки чугуна в газовых вагранках обусловлены отсутствием кокса как химического реагента. Газовая фаза имеет следующий химический состав, %: $\text{CO}_2 = 10$, $\text{H}_2\text{O} = 20$, $\text{N}_2 = 70$.

Атмосфера в шахте окислительная, поэтому процессы окисления протекают по реакциям:



При плавлении и перегреве закись железа FeO окисляет C, Si и Mn.

В итоге угорает 8–12% C, 10–15% Si и 15–20% Mn. Угар может быть и более высоким, так как отсутствует углерод кокса, который способствует развитию в микрообъемах восстановительных процессов.

В связи с отсутствием кокса насыщения металла серой не происходит, а, наоборот, 30 – 40% от первоначального содержания серы угорает. В итоге в чугуне содержится 0,02 – 0,05% S.

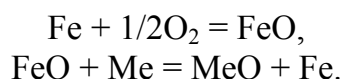
Плавка чугуна в газовых вагранках имеет следующие преимущества: выброс вредных веществ минимальный, ниже содержание серы в получаемом чугуне, выше качество и ниже его себестоимость. Недостатками являются более сложная футеровка и повышенный расход огнеупоров.

В газовых вагранках с холостой огнеупорной колошей в состав ее вместе с огнеупорными материалами вводится кокс или другой углеродистый материал, что позволяет протекать реакциям типа $\text{MeO} + \text{C} = \text{Me} + \text{CO}$. При этом снижаются угары, происходит науглероживание чугуна, улучшаются условия работы холостой колоши, так как куски углеродистого материала разъединяют куски огнеупоров и не позволяют им слипаться и оседать, газовая фаза становится менее окислительной. В газовых вагранках перегрев чугуна осуществляется так же, как в коксовых вагранках: капли металла стекают по кускам огнеупорной холостой колоши и, контактируя с ними, эффективно перегреваются. Металл, попадая на куски углеродистого материала, растворяет углерод; окислы, контактируя с углеродистым материалом, восстанавливаются. В итоге в этих вагранках угар железа значительно ниже.

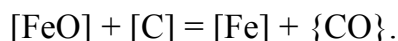
6.8 Плавка чугуна в дуговых печах

Для плавки чугуна применяют трехфазные дуговые печи, которые имеют кислую или основную футеровку. Соответственно и процесс плавки является кислым или основным. Взаимодействия фаз при тех или иных шлаках действительны и для плавки чугуна в дуговых печах, т.е. при кислом процессе кремний угорает меньше, марганец больше, чем при основном; при основном процессе можно удалить серу и фосфор.

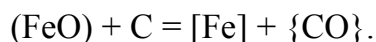
После загрузки шихты электроды опускают, и начинается процесс плавки, который характеризуется высоким усвоением теплоты шихтой, со всех сторон окружающей дугу (в период расплавления КПД достигает 85%). В шихте проплавляются так называемые колодцы. Этот период плавки сопровождается сильным шумом, треском, выделением большого количества дыма. Когда весь металл расплавится, дуга горит более спокойно, и передача теплоты происходит лишь у поверхности расплавленного металла: интенсивно в районах дуговых разрядов и менее интенсивно по остальной поверхности. Поэтому КПД при перегреве ниже. Элементы выгорают при высоких температурах и наличии в атмосфере печи кислорода. Железо окисляется, затем уже закись железа окисляет элементы (C, Si, Mn):



Характерной особенностью дуговой плавки чугуна является недопустимость закипания ванны, т. е. протекания реакции:



В связи с этим содержание FeO в шлаке не должно превышать 12%, что достигается регулярным раскислением шлака вводимым в него карбюризатором:



6.9 Технология плавки чугуна монопроцессом в дуговой печи

В качестве шихты используют в основном чугуны и стальной лом, возврат, а также некоторое количество свежих чушковых чугунов. Расчет шихты производится исходя из химического состава имеющихся шихтовых материалов и угара элементов. Обычно принимают угар углерода 10%, кремния 10% и марганца 20%. Следует учитывать, что при применении в шихте стружки угар элементов значительно возрастет.

Перед каждой плавкой проводят мелкий ремонт футеровки путем заправки подины и откосов, которая заключается в том, что на имеющиеся на подине и откосах углубления сразу по окончании предыдущей плавки наносят смесь, состоящую из 90–92% кварцевого песка, 5–6% жидкого стекла и 3–4% H₂O. При основной футеровке заправку выполняют доломитовой или магнезитовой массой.

Загрузка шихты производится при помощи специализированной бабды, в которую на шихтовом дворе помещают определенную порцию шихты (обычно масса порции составляет около половины емкости печи). Для загрузки шихты в ванну печи свод отводится в сторону, бабдю устанавливают соосно с ванной печи и раскрывают днище. В бабдю или непосредственно в печь перед загрузкой вводят карбюризатор в количестве 75% от расчетного (электродный бой, электродная крошка и т. п.).

В загруженной и закрытой сводом печи начинают процесс плавки, т. е. электроды под напряжением вводят до контакта с шихтой. После установления устойчивых дуговых разрядов печь включают на высшую ступень мощности. По мере расплавления шихты не расплавившиеся куски сталкивают в образовавшиеся колодцы. Для наведения шлака вводят шлакообразующие компоненты – известь и песок. Их массу выбирают таким образом, чтобы к концу плавки металл был покрыт слоем шлака толщиной около 50 мм. Шлак должен иметь невысокую вязкость (легко сливаться с пробной ложки), а после затвердевания иметь плотный излом с зеленоватой поверхностью. Черный цвет и пузырчатый излом шлака в твердом состоянии свидетельствуют о его высокой окисленности. В этом случае шлак надо частично удалить и ввести новые шлакообразующие компоненты.

Для наведения основного шлака в печь с основной футеровкой вводят известь в количестве 0,15 кг на 1 т металла для удаления 0,001% S.

После полного расплавления берут пробу на химический анализ и на отбел, а печь включают на вторую ступень и перегревают металл до 1400–1450 °С. Затем скачивают, т. е. удаляют, шлак, вводят в печь оставшиеся от общей расчетной массы 25% карбюризатора, а также опять песок и известь. По результатам первого экспресс-анализа добавляют в печь ферросплавы. Затем металл перегревают до 1440–1480 °С и выпускают его в ковш.

Преимуществами плавки чугуна в дуговых печах являются возможность форсированного расплавления при большой удельной мощности (до 1000 кВт на 1 т шихты) и высоком КПД, использование практически любых шихтовых материалов и широкие возможности по металлургической обработке расплава шлаками, которые имеют высокую активность благодаря нагреву от дуговых разрядов.

К недостаткам плавки чугуна в дуговых печах относятся высокий уровень шума дуговых разрядов, обильное выделение бурого дыма и низкий КПД при перегреве.

6.10 Плавка чугуна в индукционных печах

Для плавки чугуна на твердой завалке широко применяют тигельные индукционные печи. Они удобны в эксплуатации и в них легко получать различные виды чугуна. Серийно выпускают индукционные тигельные печи для плавки чугуна типа ИЧТ–0,01; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 3,0; 6,0; 10.

Футеровка индукционной плавильной печи является одним из основных и ответственных ее элементов, определяющих длительность работы и экономичность процесса. Для индукционных печей в основном применяют набивные футеровки.

Наибольшее распространение при изготовлении тиглей получила сухая набивная масса на основе молотых кварцитов или кварцевых песков с содержанием не менее 97% SiO_2 . Спекание сухой набивной массы достигается обычно за счет добавок борной кислоты в количестве 1,5–2% от массы огнеупорного материала. Достоинство кислой футеровки – невысокая стоимость и хорошая спекаемость.

Для выполнения качественной футеровки важен не только химический, но и гранулометрический состав огнеупорной массы: обычно берут 40–45% крупной фракции (2,5–0,63 мм), 10–20% средней фракции (0,63–0,1 мм) и 40–45% мелкой фракции (до 0,1 мм). В формовочную массу, предназначенную для футеровки верха печи, вводят до 2% борной кислоты, а в массу, используемую для футеровки нижней части тигля, – до 1,5%.

Кроме кислой футеровки применяют также нейтральную, выполненную при помощи глиноземистых и силлиманитовых материалов. Например, футеровка индукционных печей может выполняться из сухой набивной высокоглиноземистой массы, состоящей из 35–40% электроплавленного корунда, 60–65% дистенсиллиманита и 1–1,5% борной кислоты. Набивку футеровки производят по имеющему форму тигля печи металлическому шаблону, который расплавляется, когда футеровку подвергают спеканию. Известны два различных процесса спекания футеровки индукционных тигельных печей: с холодной садкой и с жидкой. При спекании с холодной садкой в печь загружают массивные металлические диски, температура в печи доводится за 6–8 ч до 800–900 °С. При появлении в тигле жидкого металла, т. е. по мере расплавления дисков, мощность медленно повышается. Как только тигель наполняется жидким металлом, необходимо по возможности быстрее достичь температуры спекания, равной рабочей температуре в печи. Длительность выдержки тигля с металлом при этой температуре 1 ч, после чего печь готова к эксплуатации.

При спекании футеровки печи с жидкой садкой рабочую температуру в тигле можно получить при помощи газовых горелок или форсунок, которые вводятся в печь сверху. Длительность прогрева до температуры 800 – 900 °С 6–8 ч. После прогрева до требуемых температур заливают жидкий металл с температурой ~1350°С. Металл выдерживают в тигле без пуска трансформатора 20–30 мин. Затем печь включается на малую мощность для достижения рабочей температуры при постоянном увеличении мощности.

Интервал температур от 1350 °С до рабочей следует проходить по возможности быстро. Время выдержки при рабочей температуре 1 ч.

Физико-химические особенности плавки в индукционных печах

Плавка в индукционных печах ведется с болотом – шихта загружается в жидкий металл, оставшийся от предыдущей плавки. В связи с этим нагрев и расплавление шихты связаны с растворением ее компонентов в жидком металле, которое сопровождается массопереносом между фазами и поглощением теплоты не только на нагрев, но и на растворение.

Из приведенных данных видно, что растворение углерода протекает со значительным поглощением теплоты, а растворение кремния – с выделением. Отсюда следует важный вывод, что в индукционных печах энергетически выгоднее использовать низкокремнистые шихтовые материалы, а содержание кремния доводить до требуемого при помощи ферросплавов (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Тепловые эффекты растворения

Растворитель	Растворяемый компонент	Изменение энтальпии ΔH , Дж/(г·атом)
Чугун:	Сталь (0,6% С)	1360
3,3% С	Кокс	11723
3% С	ФС75	3893

Второй важной особенностью плавки чугуна в индукционной печи является протекание тигельной реакции.

Угары элементов и весь процесс плавки в индукционной печи с кислой футеровкой тесно связаны с равновесием тигельной реакции. Диаграмма равновесных концентраций углерода и кремния при различных температурах. Если в индукционной печи плавить чугун с низким содержанием кремния и высоким содержанием углерода, то при достижении равновесной для данных концентраций кремния и углерода температуры начнет протекать тигельная реакция, что приведет к повышенному износу тигля печи и быстрому выходу ее из строя. В связи с этим температурный режим плавки в печи с кислой футеровкой необходимо выбирать в зависимости от химического состава перегреваемого жидкого чугуна.

Технология плавки в индукционной печи.

Технологический процесс плавки в индукционной печи включает следующие операции: загрузку шихты, нагрев и расплавление ее, перегрев, науглероживание и доведение химического состава чугуна до заданного, а также термовременную обработку (выдержку). Загружаемая шихта частично погружается в расплав, создавая сплошную электропроводную среду, в которой индуктором наводятся вихревые токи. Загрузка в жидкий металл (остаток от предыдущей плавки, называемый зумпфом или «болотом») необходима потому, что при использовании электрического тока промышленной частоты в дискретных элементах шихты наведение вихревых токов малоэффективно. Вихревые токи разогревают металл, и он плавится. Масса зумпфа доходит до 50% от общей массы металла в печи (емкости печи) и соответственно влияет на длительность периодов плавки. При этом загрузка в «болото» может осуществляться в несколько стадий. Так, при плавке в печи с массой садки 12 т и зумпфе массой 5 т соблюдается такая последовательность и длительность периодов: загрузка 5–6 т шихты (кроме возврата) 15 мин; рас-

плавление 1 ч 5 мин; доводка химического состава 40 мин; загрузка возврата (2 т) 10 мин; расплавление возврата 15 мин; доводка по температуре, скачивание шлака 25 мин. В результате получается, что часовая производительность печи составляет около 1/3 от ее массы садки.

Иногда цикл плавки значительно отличается от приведенного выше. Например, при плавке в индукционных тигельных печах с массой садки 65 т загрузка осуществляется порциями по 7 т в «болото» массой 58 т. Загружаемые 7 т твердого металла, подогретого до 500 °С, быстро расплавляются, и через 10 мин уже производится выдача 7 т жидкого металла с температурой 1550 °С.

Во время нагрева и плавления шихты происходят процессы окисления железа. Кислород воздуха окисляет также примеси железа. Окислы железа, кремния, марганца образуют шлак. Закись железа окисляет элементы чугуна.

При плавке чугуна в индукционных печах для восстановления железа из FeO целесообразно расходовать карбюризатор и экономить ферросплавы. Плавку необходимо вести при низком содержании кремния и марганца в расплаве и высоком содержании углерода. Для этого карбюризатор необходимо вводить на дно тигля в завалку, а ферросилиций и ферромарганец – в жидкий чугун после его расплавления и перегрева. При загрузке углеродсодержащих присадок ФС75 и ФМн5 в завалку угар С, Si и Mn составляет соответственно 18–25, 30–32 и 52–55%. Наоборот, при вводе карбюризатора в завалку, а ФС75 и ФМн5 после перегрева до 1550 °С и охлаждения в печи до 1440–1460 °С угар углерода увеличивается до 30–35%, а угар кремния и марганца резко снижается и составляет 5–7 и 18–24% соответственно. В связи с этим, а также учитывая тепловые эффекты растворения компонентов, в первую очередь необходимо загружать карбюризатор и стальной лом. После их расплавления и растворения следует производить загрузку чугунного лома и возврата, ферросплавы вводить в последнюю очередь (при доводке).

Шлаки индукционной плавки обладают большой вязкостью, так как содержат 60–70% SiO₂ и имеют низкую температуру, что может привести к значительным потерям металла со шлаком. Их состав связан с режимом плавки, угаром элементов и переходом окислов из поверхностного слоя футеровки в шлак. Кислотность шлаков возрастает от 0,9–1,1 в начале плавки до 6–8 при достижении температуры 1500 °С, содержание окислов железа в шлаке уменьшается с 40 до 10%, соответственно увеличивается содержание SiO₂ с 40 до 70%. Содержание остальных компонентов изменяется незначительно (2–3% CaO, 0,5–2,5% MnO, 7–14% Al₂O₃). Увеличение содержания SiO₂ объясняется переходом ее из футеровки в результате образования сложных соединений типа SiO₂·nFeO·mMnO, имеющих низкую температуру плавления, а также повышением ее удельной доли в шлаке вследствие снижения содержания FeO, которая восстанавливается при высокой температуре преимущественно углеродом чугуна.

Науглероживание чугуна и доведение его до определенного химического состава является одной из основных операций индукционной плавки чугуна.

Заключительной операцией индукционной плавки чугуна является термовременная обработка, которую проводят с целью гомогенизации расплава и уменьшения вредного влияния наследственности исходных шихтовых материалов. Термовременная обработка представляет собой выдержку при температуре на 50 °С превышающей равновесную температуру тигельной реакции. Длительность выдержки от 5 мин для СЧ 18 до 20 мин для СЧ 45.

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 В каких плавильных агрегатах выплавляют чугун в литейных цехах, с какой целью применяют дуплекс и триплекс процессы?
- 2 Расскажите устройство вагранки?
- 3 Дайте классификацию вагранок.
- 4 Расскажите технологию плавки чугуна в вагранке.
- 5 Дайте характеристику способов интенсификации ваграночной плавки.
- 6 Расскажите технологию плавки чугуна в дуговых печах.
- 7 Расскажите технологию плавки чугуна в индукционных тигельных печах.
- 8 В чем заключаются физико-химические процессы плавки чугуна в дуговых и тигельных печах?

Глава 7. Выплавка стали в литейных цехах

7.1 Классификация способов производства стали

Плавка стали в литейном производстве осуществляется в топливных и электрических печах (рисунок 7.1). Применяются также дуплекс- и переплавные процессы.

Периодический контактный монопроцесс осуществляется в мартеновской печи. Периодические монопроцессы в электропечах могут быть как контактными (ДСП, ПП), так и бесконтактными (ИТП). Наибольшее распространение в литейном производстве получил метод дуговой плавки.

Процессы плавки стали по своей физико-химической сущности подразделяют на кислые и основные.

Кислые процессы осуществляют в печах с футеровкой, в которой преобладает кислотный окисел SiO_2 . При кислом процессе невозможно удалить из металла серу и фосфор, что накладывает на его применение ряд ограничений. Но экономичность кислого процесса выше, чем основного; так, в случае плавки в дуговых печах при кислом процессе стойкость футеровки в 2 раза выше, длительность плавки на 20–25% меньше, расход электроэнергии на 10–15% ниже, чем при основном. В связи с этим для плавки обычных углеродистых сталей применяют кислый процесс.

Основной процесс проводят в печах с футеровкой из магнезита или хромомagneзита и с применением основных шлаков, содержащих значительно больше CaO , MgO , чем кислые шлаки. Основные шлаки позволяют осуществить процессы десульфурации и дефосфорации. Поэтому для получения высококачественных сталей применяют основной процесс.

Для получения стальных отливок применяют также переплавные процессы в ИВП и переплав в отливку под электронагреваемым шлаком, получивший название электрошлакового литья (ЭШЛ).

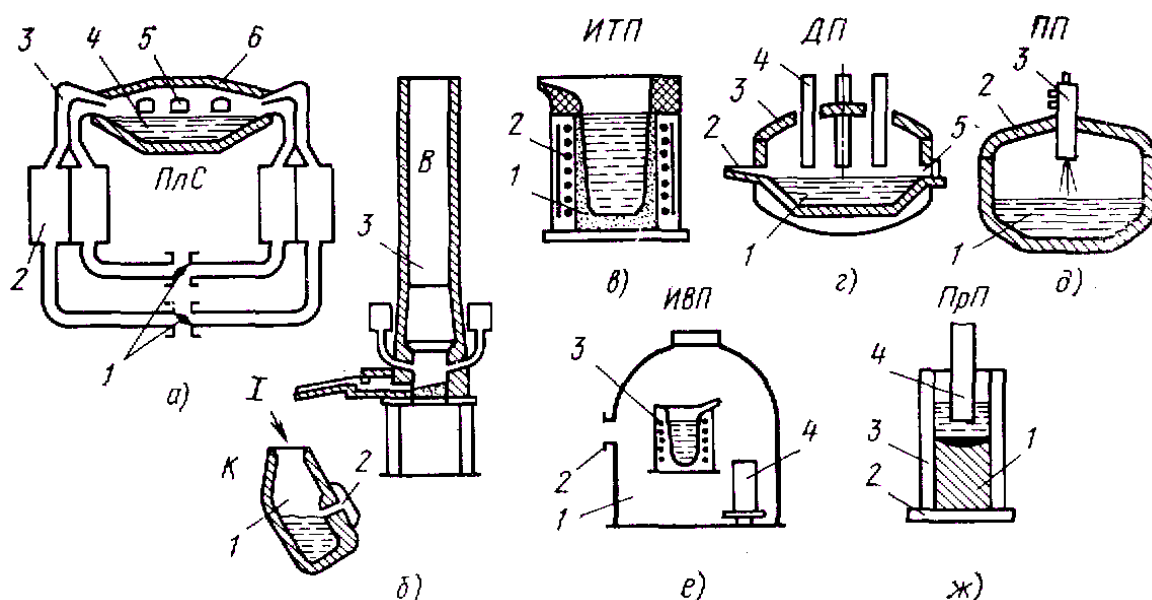
Мартеновская печь имеет футерованную ванну 4, перекрытую сводом 6, в которую через окна 5 загружается шихта.

С боковых торцов печи расположены головки 3 для сжигания топлива (газа или мазута). Газ и воздух подогреваются в регенераторах 2, в которые воздух и газ подаются по системе каналов с перекидными клапанами 1, обеспечивающими поочередную работу регенераторов, т.е. при работе левых регенераторов на нагрев воздуха правые нагреваются отходящими газами, и наоборот.

Дуплекс-процесс: вагранка – конвертер осуществляется путем плавки в вагранке 3 и дальнейшей продувки жидкого металла в конвертере 1 воздухом через фурмы 2.

Индукционные печи имеют тигель 1 с индуктором 2, процесс аналогичен процессу плавки чугуна, только без науглероживания.

Дуговые печи имеют ванну 1, в которую загружают шихту; свод 3 с электродом 4 при этом отводится в сторону. Рабочее окно 5 используют для наведения шлаков, введения добавок и т. п., по желобу 2 выпускают готовую сталь. Аналогичное устройство имеют плазменные печи. В ванну печи 1 загружают шихту, в своде 2 установлен плазмотрон 3.



а – пламенная стационарная печь (мартеновская); б – вагранка в дуплексе (I) с конвертером; в – индукционная тигельная печь; г – дуговая печь; д – плазменная печь; е – индукционно-вакуумная печь; ж – электрошлаковая печь

Рисунок 7.1 – Технологические схемы печей для плавки стали

Индукционная вакуумная печь состоит из вакуумной камеры 1, подсоединенной патрубком 2 к вакуум-насосу. Печь 3 и форма 4 расположены внутри камеры.

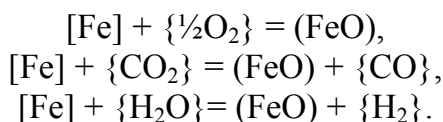
Переплавный процесс осуществляют переплавом исходного слитка 4 в отливку 1, формируемую на поддоне 2 в кристаллизаторе 3 электрошлаковой печи.

7.2 Общая характеристика процесса плавки стали

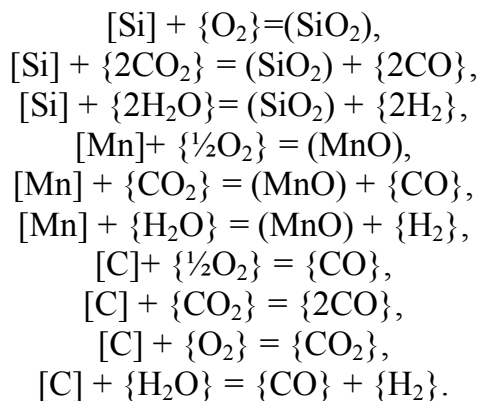
Поскольку требуемые свойства в отливке необходимо обеспечить без дальнейшего металлургического передела, необходимо получить сталь с минимальным содержанием вредных примесей. Особенно важно снизить содержание кислорода, серы и фосфора, так как эти элементы образуют в стали оксидные, сульфидные и окисульфидные включения. Сталь с низким содержанием вредных примесей имеет более высокое качество. Снижение содержания фосфора упрочняет металлическую матрицу, а снижение содержания серы с 0,03 до 0,01% увеличивает ударную вязкость стали в 2–3 раза.

В подготовленную сталеплавильную печь загружают шихту, затем ее нагревают, расплавляют, при этом образуются жидкий металл и шлак. Далее следует обработка жидкого металла под шлаком, удаление этого шлака, затем берут пробу и сталь доводят до требуемого состава. Во время доводки возможно наведение нового шлака, например, с целью удаления вредных примесей, т.е. улучшения качества стали. Во всех случаях на заключительном этапе производят раскисление стали. Для получения высококачественных сталей целесообразно модифицировать сталь силицидами РЗЭ.

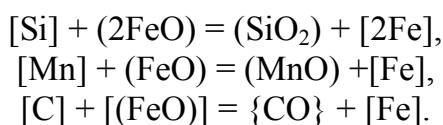
Формирование состава стали происходит в результате взаимодействия фаз при плавке. Рассмотрим отдельно каждый период. Шихта для плавки стали содержит большое количество стального лома. Передельного чугуна расходуется около 150 кг на 1 т годных стальных отливок. Стальной лом уже во время нагрева окисляется, так как печная атмосфера, взаимодействующая с металлом содержит газы-окислители O_2 , CO_2 и H_2O , окисляющие в первую очередь железо:



При взаимодействии газовой фазы с металлом окисляются также и другие элементы:



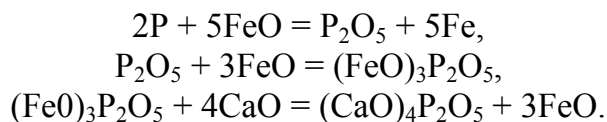
Элементы, обладающие большим сродством к кислороду, чем железо, окисляются закисью железа:



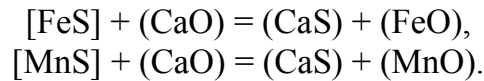
Приведены реакции только для основных элементов. Аналогично может быть описано окисление любого элемента, если оно термодинамически возможно. Окислительный период характеризуется высокими окислительными свойствами шлака. По окончании окислительного периода и, особенно, при проведении восстановительных процессов (например, под белым или карбидным шлаком) термодинамика процессов резко изменяется. В этом принципиальное отличие сталеплавильных процессов от процессов плавки чугуна.

Реакции в зависимости от вида сталеплавильного агрегата и состава шихты развиваются в различной степени. Реакции окисления элементов закисью железа протекают лишь тогда, когда металл покрывается слоем окислов. Эти реакции характерны для периода перегрева и доводки металла под окислительным шлаком.

В соответствии с общими физико-химическими закономерностями под окислительным шлаком вначале более активно выгорают кремний и марганец, и затем начинается кипение ванны вследствие выделения пузырьков СО. Если для кипения ванны недостаточно образовавшегося ранее FeO, то в печь вводят железную руду. В зависимости от разновидности сталеплавильного процесса доводятся либо до полного окисления примесей, либо на какой-то стадии прекращаются. Под окислительным шлаком в основном процессе удаляется фосфор:

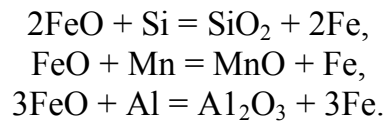


Для успешного удаления фосфора необходимо наличие FeO и CaO в шлаке и не требуется высокая температура. По окончании обработки стали под окислительным шлаком этот шлак скачивают. Далее перегрев и доводка металла в печи осуществляются с участием восстановительных шлаков, специально наводимых для этого, во время перегрева и доводки вводят ферросплавы для получения заданного химического состава стали. Для удаления серы наводят шлак с высокой основностью, т. е. содержащий много CaO. При этом сера, находящаяся в виде сульфидов, удаляется в шлак:



Для более полного удаления серы необходимо высокое содержание CaO в шлаке и высокая температура. В этот период через шлак производится также и раскисление металла, для чего на поверхность шлака вводят углерод и кремний, которые, взаимодействуя с закисью железа резко снижают ее содержание в шлаке и смещают равновесие распределения $[\text{FeO}] = (\text{FeO})$ вправо, т. е. способствуют переходу закиси железа из металла в шлак.

По окончании обработки металла под шлаком шлак скачивают и после этого выпускают сталь. Перед выпуском или во время выпуска сталь раскисляют, применяя различные раскислители, содержащие Si, Mn и Al. При этом протекают следующие реакции раскисления:



Между содержанием элемента-раскислителя $[\text{Э}_R]$ и остаточным содержанием кислорода $[\text{O}]$ имеется установлена связь, которая трактуется как раскислительная способность элементов (рисунок 7.2).

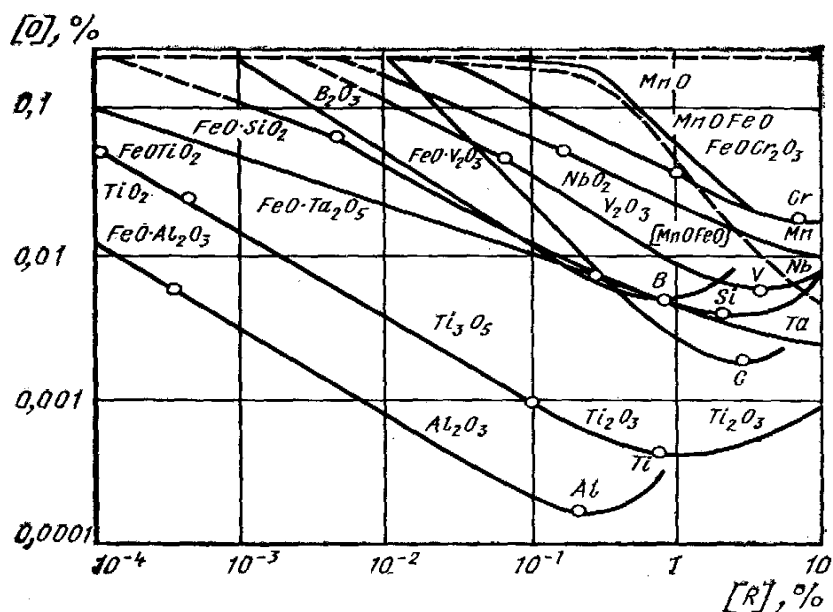


Рисунок 7.2 – Раскислительная способность элементов в жидком железе при 1600 °C

Механизм процессов, происходящих при плавке стали, связан прежде всего с передачей кислорода из газовой фазы и шлака металлу.

В левой части схемы дан молекулярный механизм переноса кислорода, а в правой – ионный (рисунок 7.3).

Кремний, марганец, фосфор и другие элементы, которые образуют при окислении шлакообразующие соединения, окисляются по реакциям, протекающим на поверхности раздела металл–шлак.

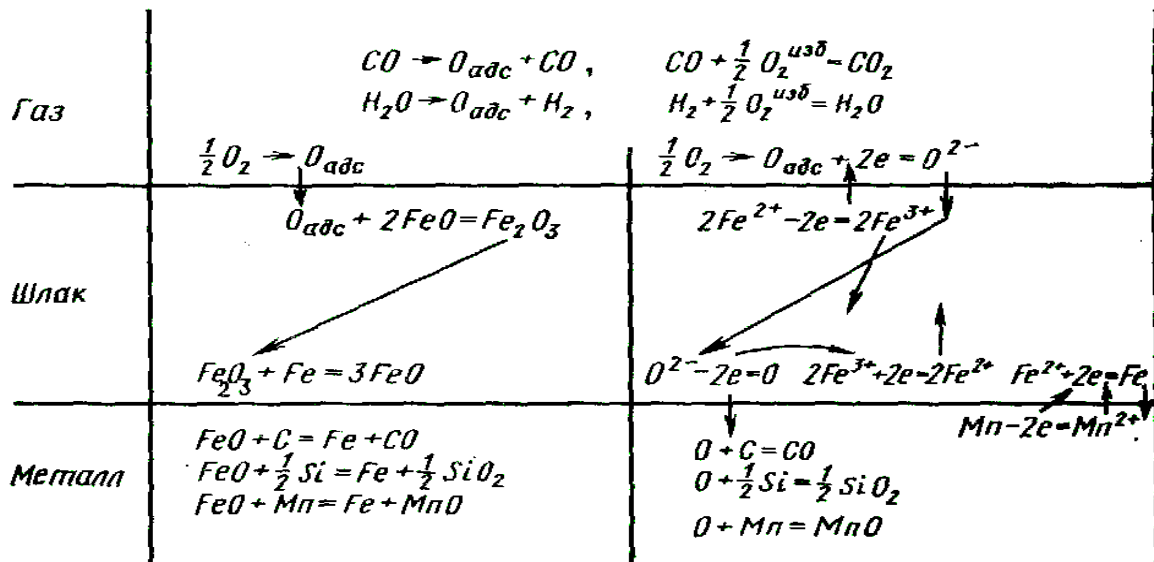
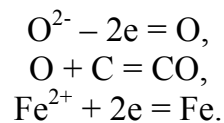


Рисунок 7.3 – Схема передачи кислорода из газовой фазы металлу через шлак

Окисление углерода может протекать по всему объему. Пузырьки CO в этом случае возникают вероятнее всего на подложке, например, на границе металл – футеровка. Механизм кипения аналогичен возникновению пузырьков пара на стенках сосуда, в котором кипятят какую-либо жидкость. Закись железа постепенно вырабатывается из шлака, так как она идет на окисление элементов на границе раздела металл–шлак и сама окисляется на поверхности раздела шлак–газ. Если шлак имеет высокую вязкость и низкую температуру, то механизм окисления может полностью замкнуться на выработку FeO по схеме:



Таким образом, для успешного протекания окислительных процессов необходимы, максимальная температура и высокое содержание в шлаке FeO.

В последнее время десульфурацию стали стараются производить внепечной обработкой. Например, обработка жидкой стали в ковше белым шлаком обеспечивает снижение содержания серы на 70% от первоначального, для этого используют специальные шлакоплавильные печи.

Кроме раскисления внепечная обработка может включать также модифицирование. Значительную часть отливок из сталей, легированных, например, дорогими и дефицитными Ni, Mo, W, можно успешно заменить экономно-легированными сталями, модифицированными щелочноземельными и редкоземельными элементами в виде комплексных лигатур.

7.3 Плавка стали в мартеновской печи

В сталелитейном производстве мартеновские печи применяют для получения крупных стальных отливок.

Процесс плавки стали в мартеновской печи состоит в последовательных операциях: заправки печи, загрузки шихты и ее плавления, окисления (кипения), перегрева, доводки и раскисления и выпуска.

Основной мартеновский процесс.

Заправка печи осуществляется нанесением на поврежденные участки футеровки основных огнеупорных материалов, в качестве которых применяют магнезит и обожженный доломит. Продолжительность заправки 10–15 мин. Тепловая нагрузка 70–80% от максимальной (максимальная тепловая мощность $2,1 \cdot 10^7$ кДж/ч на 1 м^2 площади пода), средняя тепловая мощность за весь период плавки $(1,26-1,47) \cdot 10^7$ кДж/ч на 1 м^2 . По окончании заправки выпускное отверстие заделывают магнезитовым порошком.

Шихта мартеновской плавки стали содержит до 30% передельного чугуна, 10–15% стальной стружки, остальное – стальной лом и возврат собственного производства. При расчете шихты исходят из того, чтобы содержание кремния было минимальным (он потом вводится при доводке и раскислении), содержание марганца около 1%, углерода на 0,3–0,6% выше требуемого в стали, фосфора не более 0,3%, серы до 0,05–0,06%. Повышенное содержание углерода и определяемая им доля передельного чугуна в шихте необходимы для обеспечения нормального кипения, т. е. достаточно интенсивного во время периода окисления.

Окисление компонентов металла начинается уже во время нагрева шихты. Шихта контактирует с окислительной атмосферой. На подину загружают сначала легковесный чистый лом в количестве 10–25% от общей массы, затем известняк, иногда боксит, прогревают загруженную массу 20 мин, после чего загружают чугун. Таким образом, загрузка частично совпадает с периодом нагрева. Продолжительность загрузки зависит от массы садки печи. Для печи с массой садки 60 т она составляет от 1 до 3 ч. При этом, чем быстрее производится загрузка, тем меньше общее время плавки, которое в целом составляет 8–10 ч. Из них около 3 ч уходит на все периоды, кроме загрузки, нагрева и плавления. В связи с этим нагрев и плавление нужно вести форсированно, на полной тепловой мощности. Для ускорения процесса плавления производят обогащение воздуха кислородом, применяя сводовые топливно-кислородные горелки, или вводят кислород непосредственно в печь для интенсификации процессов путем создания локальных конвертерных зон, в которых расплавленный металл реагирует с кислородом.

По окончании расплавления проводят экспресс-анализ стали. Если углерода недостаточно, то в печь вводят передельный чугун. Шлак во время этого периода должен быть активным, т. е. содержащим много окислов железа, основность его должна быть 1,5–2,5. Для создания такого шлака используют 4–9% известняка, около 1,5% боксита и 2% железной руды. Количество добавок может быть определено расчетом по методике. Если шлак не удовлетворяет условиям проведения следующего периода, то его частично или полностью скачивают и наводят новый шлак: для дефосфорации требуется высокое содержание FeO и CaO в шлаке, для чего вводят железную руду. Дефосфорация совпадает с началом периода окисления углерода (кипением). Чем интенсивнее кипение, тем лучше протекает дефосфорация. Продолжительность дефосфорации около 1 ч. К концу периода содержание фосфора снижается до 0,025%. Шлак, богатый $(\text{CaO})_4\text{P}_2\text{O}_5$, скачивают, в печь снова добавляют известь и боксит. Наведение нового шлака продолжается

также около 1 ч. Кипение происходит как за счет кислорода вводимой руды, так и за счет передачи кислорода через шлак из газовой фазы.

По окончании наведения нового шлака начинается так называемое чистое кипение, происходящее без введения руды. Закись железа из шлака постепенно вырабатывается, создаются условия для десульфурации, основность шлака доводят до 2,2–3,5. Наиболее благоприятные условия для их протекания складываются в начале периода раскисления, которое производится в два этапа: во-первых, при достижении заданного содержания углерода в печь вводят силикомарганец или ферросилиций из расчета наличия в ванне 0,10–0,17% Si. Этот этап раскисления можно произвести и при помощи ферромарганца, который вводят из расчета получения содержания марганца, равного нижнему пределу для выплавляемой марки стали.

Раскисление ферросплавами совмещается с доводкой химического состава стали до требуемого. При выплавке легированных сталей часть легирующих компонентов, например никель, вводят с шихтой. Хром в виде феррохрома вводят во время доводки после первого этапа раскисления, ферромolibден – в период дефосфорации и наведения шлака, а марганец – после первого этапа раскисления.

Второй этап раскисления производят во время выпуска стали в ковш путем подачи на желоб дробленого ферросилиция ФС75. Для окончательного раскисления в ковш вводят алюминий в количестве 0,8–1 кг/т.

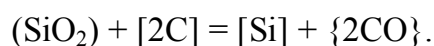
Кислый мартеновский процесс. Футеровка печей кислая, подина из кварцевого песка. В связи с тем, что при кислом процессе невозможно удалять серу и фосфор, содержание их в шихте должно быть минимальным, так как оно полностью определяет конечное содержание этих вредных примесей в металле.

Кислый процесс плавки, так же как и основной, включает операции заправки подины, загрузки и расплавления, окисления, доводки и раскисления. Шлак наводят, загружая в печь 3–4% оборотного шлака плавки, 0,3–0,5% шамотного боя; основность регулируют добавкой известняка.

Для кислого процесса характерно протекание кремнийвосстановительных реакций и более низкая окислительная способность шлака. В результате получается более низкая концентрация кислорода в металле.

Различают две разновидности кислого мартеновского процесса: кремнийвосстановительный (пассивный) и с ограниченным восстановлением кремния (активный).

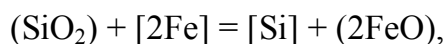
Активный процесс плавки во многом аналогичен описанному выше. В печь подают руду, элементы окисляются, и происходит восстановление кремния углеродом металла по реакции:



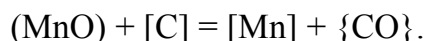
Содержание кремния и марганца по ходу плавки уменьшается.

При кремнийвосстановительном процессе содержание кремния и марганца, наоборот, увеличивается. По окончании расплавления углерода должно быть не менее чем на 0,8% больше требуемого содержания в стали. Присадку руды дают малыми порциями и прекращают за 2 ч до раскисления. Известняк добавляют только в начальный период.

Для восстановления кремния необходима высокая температура. При этом кроме реакции с участием углерода, протекает реакция восстановления кремния железом:



т. е. реакция окисления кремния закисью железа изменяет свое направление. Кроме того, при этом восстанавливается марганец по реакции:



При кремнийвосстановительном процессе сталь частично раскисляется без ввода раскислителей. На выпуске сталь раскисляют алюминием.

7.4 Выплавка стали в конвертере

В отличие от всех других сталеплавильных процессов получение стали в конвертере осуществляется при использовании в качестве исходного материала жидкого чугуна, выплавляемого в вагранке. Обычно в сталелитейном производстве применяют малобес-семеровские конвертеры с боковым воздушным дутьем. Можно использовать для получения жидкой стали для фасонного стального литья и кислородные конвертеры с верхним дутьем, получившие распространение в металлургии.

Принцип действия конвертера состоит в том, что кислород воздуха, контактируя с жидким металлом, окисляет Fe, Si, Mn, C и другие элементы, которые присутствуют в исходном металле, в результате чего выделяется теплота, температура металла увеличивается и за весьма короткое время (около 15 мин) чугун превращается в сталь.

Малобес-семеровские конвертеры имеют массу садки 1–5 т. Форма реторты конвертера несимметрична относительно вертикальной оси. Уклон горловины около 30°, что дает возможность заливать жидкий металл при горизонтальном положении конвертера. Футеровка конвертера кислая, из динасового кирпича.

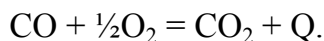
Перед плавкой футеровку конвертера необходимо разогреть до температуры 1000–1100 °С. Разогрев производят жидким, газообразным топливом или коксом.

Процесс начинается с заливки в конвертер жидкого чугуна, химический состав и температура которого оказывают существенное влияние на ход процесса, температуру полученной стали и ее качество. Обычно жидкий чугун имеет следующий состав (%): 2,8–3,5 C, 0,9–2,2 Si, 0,7–1,0 Mn, <0,06 S, <0,07 P. Чем ниже содержание углерода и кремния, тем выше должна быть температура заливаемого чугуна. Обычно она колеблется в пределах 1300–1400 °С. При переливе теряется около 50 °С, поэтому из вагранки надо получать чугун с температурой 1350–1450 °С.

Шихта для плавки чугуна в вагранке состоит из 40–60% стального лома и 60–40% передельного (желательно малофосфоритного) чугуна.

Залитый в конвертер жидкий чугун продувают воздухом давлением 0,02–0,04 МПа, нагнетаемым специальными воздуходувками в количестве 720–800 м³ на 1 т металла. Интенсивность подачи дутья 75–100 м³/мин.

Воздух, контактируя с металлом, окисляет в соответствии с законом действующих масс в первую очередь железо. Кремний и марганец также окисляются кислородом, а также закисью железа. Температура металла увеличивается, начинается выгорание углерода. Этот период продувки характеризуется выделением из горловины конвертера пламени, образующегося от догорания CO с выделением тепла по реакции (рисунок 7.4):



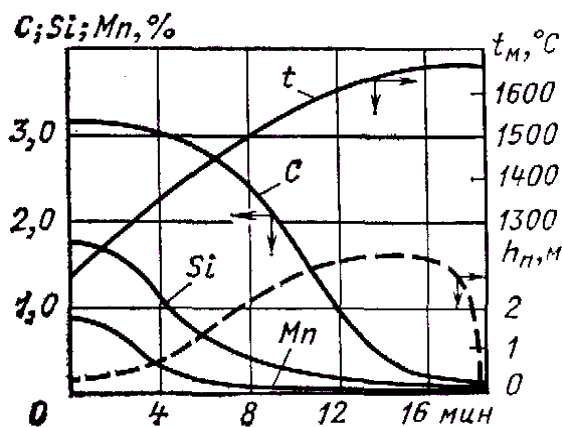


Рисунок 7.4 – Изменение химического состава и температура металла при продувке его воздухом в конвертере (t_M – температура металла; h_P – высота пламени)

К концу продувки пламя спадает, и приступают к доводке металла и его раскислению. Недостающее количество углерода вводится с ферромарганцем, содержащим до 7% С. Одновременно происходит доводка по марганцу и раскисление. Перед выпуском или во время выпуска вводят ферросилиций, а затем и алюминий. Серьезным недостатком получения стали в кислом конвертере с воздушным дутьем является невозможность удаления серы и фосфора.

Продувка жидкого чугуна может производиться в глухонном конвертере кислородом, вдуваемым под давлением 0,8–1,2 МПа через вертикальную форму. Футеровка конвертера – основная, что позволяет удалять серу и фосфор.

Применение кислорода интенсифицирует процесс, позволяет добавлять стальной лом, делает процесс независимым от состава чугуна. В кислородные конвертеры заливают жидкий передельный чугун. Обычно этот чугун содержит 3,7–4,4% С, 0,3–1,7% Si, 0,4–2,5% Mn, 0,3% P, 0,03–0,08% S. Количество стального лома, загружаемого в конвертер, зависит от содержания кремния и марганца и температуры заливаемого чугуна. Оно достигает 25–30% от массы заливаемого чугуна. Для наведения шлаков используется известь в количестве до 9% от массы металлической шихты. Высокая производительность и широкие металлургические возможности кислородно-конвертерного процесса позволяют применять его и для фасонного стального литья.

7.5 Плавка стали в дуговых печах

Основную массу стали в литейном производстве выплавляют в дуговых печах. В сталелитейных цехах применяют дуговые сталеплавильные печи следующих ёмкостей: ДСП-3; 5MT; 6; 12; 25; 50. Все дуговые печи являются агрегатами периодического действия. В литейных цехах крупносерийного конвейерного производства устанавливают большое число печей с относительно небольшой массой садки. При этом три-четыре печи обеспечивают металлом один конвейер. По способу загрузки дуговые печи бывают двух типов: с выкатной ванной и с поворотным сводом. Ванну печи освобождают от свода и сверху при помощи специальной бадьи в нее загружают шихту. Шихта содержит 55–65% стального лома, 37–40% возврата, 2–3% передельного чугуна.

Различают основной и кислый процессы. Основной процесс позволяет удалять из металла серу и фосфор и производить диффузионное раскисление под так называемым белым шлаком, т.е. хорошо раскисленным, не содержащим окислов железа.

В дуговых печах с основной футеровкой получают около 35% всей стали, выплавляемой в электропечах для фасонного литья; из них 20% приходится на долю высокомарганцовистых сталей, 5% – на долю высокохромистых и хромоникелевых сталей, остальные 10% – на ответственные марки углеродистых и низколегированных сталей.

Плавку стали при основном процессе ведут либо с окислением примесей, либо методом переплава, т. е. без окисления.

7.5.1 Плавка стали с окислением примесей

Шихту составляют таким образом, что после расплавления содержание углерода было на 0,2–0,3% выше верхнего предела для данной марки стали. В завалку дают 3% извести и 2% железной руды, которые сразу же после расплавления образуют дефосфорирующий шлак, так как требуют наличия FeO в шлаке и протекают при сравнительно низких температурах. Содержание фосфора в шлаке значительно увеличивается: уже после расплавления оно составляет в пересчете на P₂O₅ 1,5%. Этот шлак удаляют и в печь снова дают известь и руду. Пузырьки вспенивают шлак, который желательнее непрерывно удалять через порог рабочего окна. В начальный период окисления продолжается дефосфорация, поэтому шлак окислительного периода вновь скачивают.

Скачиваемый шлак окислительного периода обычно содержит 40–50% CaO, 10–25% SiO₂, 12–15% FeO, 4–10% MgO, 5–10% MnO, 2–4% Al₂O₃, 0,5–2% P₂O₅. Для интенсификации окисления иногда производят продувку жидкого металла кислородом под давлением около 1 МПа. Кислород вводят через трубу диаметром 15–25 мм, которая снаружи защищена шамотными трубками (надетыми на стальные). Скорость выгорания углерода увеличивается от 0,3–0,6%/ч при рудном процессе до 1,5%/ч при продувке кислородом.

Восстановительный период включает десульфурацию, доведение температуры и состава стали до заданных значений и раскисление. Для десульфурации в печь вновь вводят известь. Шлакообразующая смесь, кроме извести, содержит плавиковый шпат и песок (или бой шамота). Общее количество смеси 3–5% от массы металла. После расплавления шлака его раскисляют молотым ферросилицием в смеси с коксом. Количество вводимой смеси 10 кг/т в пропорции 1:1. После раскисления шлак становится белым (таблица 7.1), называемым так потому, что после остывания на воздухе он рассыпается в белый порошок.

В составе шлака значительно снижается содержание окислов железа, так как они восстанавливаются углеродом и кремнием:

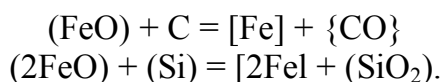
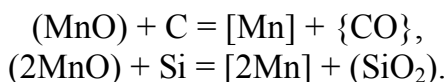


Таблица 7.1 – Химический состав белого и карбидного шлака

Шлак	Содержание, %								
	CaO	SiO ₂	FeO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	CaS	CaC ₂
Белый	60–65	14–16	До 1,5	До 0,6	10–12	2,5–4,0	5–10	До 1,5	–
Карбидный	65–66	7–8	До 0,5	До 0,1	13–14	2,0–3,0	8–12	2–3	2–5

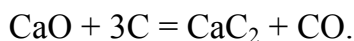
Равновесие реакции [FeO] = (FeO) нарушается, закись железа переходит из металла в шлак, раскисление которого периодически повторяется.

Восстанавливаются также и оксиды марганца:

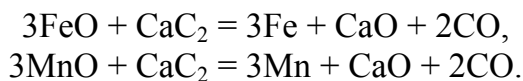


Во время восстановительного периода сталь доводят до заданного химического состава. Длительность восстановительного периода 30–60 мин. По его окончании сталь выпускают из печи и раскисляют алюминием. Выпуск металла можно осуществлять вместе со шлаком. При этом за счет перемешивания металла и шлака протекает дополнительная десульфурация. По данным работы, таким образом можно снизить содержание серы на 50%.

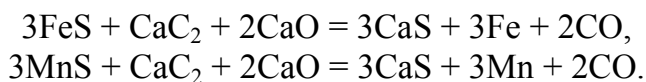
Одной из разновидностей белого шлака является карбидный, который образуется при некотором избытке кокса. Для создания этого шлака после скачивания окислительного шлака наводят известковый шлак (80% CaO и 20% CaF₂) в количестве 3–4% от массы металла, затем дают на шлак молотый кокс в количестве 0,6–0,8% от массы металла. Его равномерно рассыпают по всей поверхности, печь герметизируют и включают дуговые разряды, в зоне действия которых при высокой температуре протекает реакция образования карбида кальция:



Раскисление идет уже двумя путями, т.е. под белым шлаком и за счет карбида кальция:



Удаление серы также достигается в результате протекания реакций:



Плавка под карбидным шлаком производится редко и в основном для получения высокоуглеродистой и легированной инструментальной стали.

7.5.2 Плавка стали без окисления примесей

Этот метод применяют для плавки средне- и высоколегированных сталей. Плавка в этом случае производится без добавки руды. Отсутствие окисления позволяет экономически выгодно использовать легирующие элементы, ибо они не угорают. Однако создается опасность накопления вредных примесей. Качество стали, полученной этим методом, не уступает качеству стали, полученной при плавке с окислением примесей. Производственный опыт показывает, что накопления вредных примесей не происходит. Исключения составляют высокомарганцевые стали, которые интенсивно поглощают азот из воздуха, однако для этих сталей азот оказался полезным компонентом. Технология плавки стали в дуговой печи без окисления примесей такая же, как и с окислением, т. е. включает все основные операции, только окислительный шлак не наводят, шлак плавки удаляют и производят раскисление либо под белым шлаком, либо при помощи ферро-

сплавов. Иногда для интенсификации процесса производят продувку ванны кислородом. Но этот процесс является уже смешанным.

7.5.3 Выплавка стали кислым процессом

Этот процесс получил наибольшее распространение. Он более производительный и широко применяется для углеродистых и низколегированных сталей. Кислый шлак имеет меньшую электрическую проводимость, чем основной: дуги разрывают шлаковый покров и контактируют непосредственно с металлом, что интенсифицирует перегрев. В то же время шлак имеет более низкую температуру и отражательную способность, чем при основном процессе. Все это способствует увеличению КПД и срока службы футеровки печи.

Для образования кислого шлака в печь обычно вводят кварцевый песок и небольшое количество железной руды и извести в соотношении $\text{SiO}_2/(\text{FeO} + \text{MnO})$ в шлаке около единицы. Под таким шлаком ванна хорошо кипит, кипение длится недолго. Затем шлак сгущают присадкой песка и начинают восстановительный период плавки.

Процесс плавки, как и в кислой мартеновской печи, может быть активным и кремнийвосстановительным. При активном процессе в металл вводят около 1% руды. При кремнийвосстановительном процессе окисление заканчивается раньше и начинается восстановление кремния.

Раскисление металла при кислом процессе производят либо после удаления окислительного шлака, либо без удаления путем изменения его состава. Наведение нового шлака осуществляют обычно при изготовлении высококачественной стали путем введения в печь боя шамота, песка и извести. Раскисление проводят в две стадии силикомарганцем или ферросилицием, а при выпуске металла – алюминием.

Рассмотрим в качестве примера плавку стали в кислой дуговой печи ДС5МТ. Состав металлической шихты для стали 25Л: 58% стального лома, 40% возврата и 2% переловочного чугуна.

Подготовка печи к плавке производится следующим образом. По окончании выпуска стали необходимо очистить подину печи и откосы футеровки печи от остатков жидкой стали и шлака, затем произвести осмотр футеровки печи с целью определения ее состояния и возможности допуска к последующей плавке. При наличии после выпуска стали на футеровке стен, откосах и подине печи выбоин, неровностей, местных углублений производят заправку их смесью песка с жидким стеклом. Заправку производят как можно быстрее, стараясь сохранить температуру футеровки после выпуска стали с целью лучшей привариваемости материала заправки. При холодных ремонтах или после ремонта значительных повреждений футеровки электродуговых печей необходимо произвести промывочную плавку для неотвественного литья. Перед включением печи на плавление ремонтируют порог рабочего окна, а также заделывают выпускное отверстие печи.

Шихтовые материалы перед загрузкой взвешивают. Загрузку печи производят через ее верх, при этом ванну печи выкатывают. При загрузке бадью опускают как можно ниже, чтобы не повредить подину печи ударами шихты. Мелкую шихту и стружку загружают вниз на подину. Загрузка должна вестись форсированно, а укладка шихты должна быть плотной. По окончании загрузки печь ставят в первоначальное положение, закрывают замки ванны и опускают свод. Перед включением, если печь холодная, подкладывают под каждый из электродов куски кокса для облегчения зажигания и спокойного горения электрических дуг.

Печь включают и дают максимальную силу тока. По мере образования под электродами озерков расплавленного металла, для наведения шлака и более спокойного горения дуги в печь вводят 30 – 40 кг песка и 10–15 кг известняка. Форсирование плавления шихты необходимо проводить путем подрезки кислородом и сталкиванием шихты с откосов в центр ванны. В случае выделения белого дыма с серыми хлопьями (в этом случае говорят, что печь «снежит»), что происходит при близком положении дуги к подине, печь надо немедленно выключать, электрод поднять и в образовавшиеся колодцы под электродами столкнуть шихту.

При полном расплавлении шихты берут пробу металла для экспресс-анализа на С, Mn, S, P. Оптимальное содержание углерода перед началом окислительного периода 0,45–0,70%. Для окисления углерода в хорошо нагретый металл присаживается малыми порциями железная руда, после каждой порции дается выдержка 5–10 мин. Кипение металла должно быть по всей поверхности. В случае бурного вскипания ванны печь выключают и в шлак добавляют песок. Продолжительность окислительного периода должна быть не более 40 мин, включая и кипение.

При достижении среднего содержания углерода по заданному анализу шлак должен быть нормальной жидкоподвижности, плотным, тянуться в нить и в изломе иметь зеленый цвет. При нормальном шлаке и достижении требуемого содержания углерода для раскисления металла в ванну присаживают ферросилиций ФС45. При этом ванну тщательно перемешивают. Через 10–15 мин ванну перемешивают вторично и берут пробу на раскисленность и температуру. Залитая в стаканчик проба металла, хорошо раскисленного кремнием, не должна искрить, при затвердевании металл должен давать усадку. Перед выпуском металла ванну необходимо тщательно перемешать, взять еще раз пробу на раскисленность и температуру и выпустить сталь в предварительно подогретый до 800–900 °С ковш. Выпускной желоб должен быть тщательно очищен и хорошо просушен. На желоб перед выпуском дают силикокальций. При нормальной температуре и раскисленности кремнием за 4–5 мин до выпуска в ковш вводят требуемое количество ферромарганца.

Необходимое количество добавок обычно вводят, руководствуясь опытом работы и с учетом экспресс-анализа. Все добавки (руды, извести, ферросплавов) могут быть рассчитаны по методике. Массу вводимого ферросплава для раскисления можно определить по формуле:

$$M_{\text{FeR}} = (R_{\text{гот}} - R_{\text{ост}}) 10^4 / [R_{\text{FeR}} (100 - Y_{\text{R}})],$$

где M_{FeR} – масса ферросплава (в кг) на 100 кг раскисленного металла;

$R_{\text{гот}}$ и $R_{\text{ост}}$ – содержание элемента в готовой стали и перед ее раскислением;

R_{FeR} и Y_{R} – содержание элемента раскислителя в ферросплаве и его угар, т. е. расход на раскисление (при введении в печь он составляет 50–75%, в ковш – 5–20%).

Окончательное раскисление стали производится алюминием, который подается на дно ковша (1,0–1,2 кг на 1 т жидкой стали). Температура на желобе должна быть в пределах 1500–1580 °С по оптическому пирометру без поправки. Металл в ковше должен быть покрыт защитным слоем шлака толщиной 100–150 мм.

7.6 Плавка стали в индукционных печах

При плавке стали в кислых индукционных печах шихта должна состоять из чистых не окисленных материалов с минимальным содержанием серы и фосфора; при плавке в основных печах требования по содержанию в шихте серы и фосфора менее жесткие, так как в этих печах можно провести процессы дефосфорации и десульфурации. Процесс плавки состоит из загрузки, расплавления, доводки, раскисления и выпуска расплава. Для предохранения тигля от ударов крупными кусками на его дно целесообразно укладывать часть мелкой шихты, лучше стружку, затем малоокисляемые ферросплавы и далее крупную шихту. Крупные куски желателно загружать ближе к стенкам тигля и укладывать плотно.

При появлении видимых участков жидкого металла в тигель вводят шлаковую смесь, в результате чего уменьшается окисление и поглощение жидким металлом газов из атмосферы. Для наведения шлака в кислой печи вводят следующие компоненты: 10% молотого стекла, 65% шамота и 25% извести или кварцевого песка. При плавке в основном тигле шлаковую смесь наводят из следующих компонентов: 60–65% извести, 15–20% магнезита и 20–25% плавикового шпата.

После расплавления основной массы шихты (80–95%) берут пробу металла на химический анализ. В процессе плавки шихты в основном тигле происходит частичная дефосфорация металла. Для предотвращения восстановления фосфора необходимо удалить шлак и навести новый.

После полного расплавления шихты подводимую мощность снижают до 30–40% от максимальной мощности, стараясь не допустить перегрев. После анализа металла приступают к раскислению и легированию.

При плавке стали в индукционных печах ферросплавы присаживают обычно в следующем порядке. Основное количество ферровольфрама, феррохрома и ферромolibдена вносят в завалку. Для корректировки эти сплавы загружают в тигель не позднее чем за 20 мин до выпуска, что обеспечивает их расплавление и равномерное распределение легирующего элемента по объему металла. Феррованадий, ферромарганец и ферросилиций присаживают за 7–10 мин до выпуска. Феррованадий с целью уменьшения угара присаживают в последнюю очередь. Алюминий и титан вводят в металл непосредственно перед выпуском или в ковш. Угар легирующих элементов зависит от состава стали и метода введения их. При описанной выше технологии легирования и раскисления металла угар вольфрама составляет около 2%, марганца, хрома и ванадия 5–10%, кремния 10–15%, титана 70%.

Индукционные плавильные печи являются экономичными плавильными агрегатами, они позволяют выплавлять средне- и высоколегированные стали при минимальных потерях легирующих элементов.

7.7 Технология получения высококачественной стали для отливок

Свойства стали в отливке в значительной степени зависят от технологии ее получения, определяющей содержание, состав, форму и распределение неметаллических включений.

Большое значение имеет содержание серы, фосфора, кислорода, азота, водорода. Поэтому технология получения высококачественной стали должна обеспечивать минимальное содержание вредных примесей, наименее вредную форму неметаллических включений и требуемую структуру.

Процесс получения высококачественной стали состоит из трех основных этапов: плавки, внепечной обработки и термической обработки (рисунок 7.5).

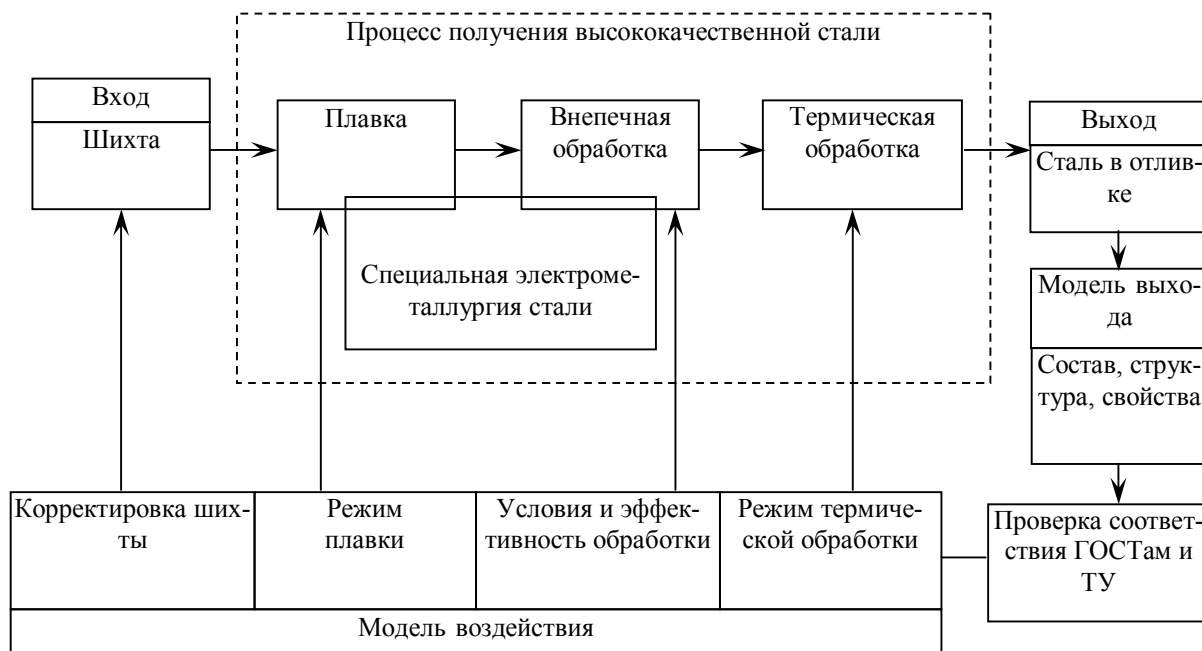


Рисунок 7.5 – Схема получения высококачественной стали

Качество стали в отливке (выход системы) зависит от качества входа, т. е. шихты. Особенно важно обеспечить минимальное содержание вредных примесей в шихте при кислом процессе, так как в этом случае невозможно удалить в печи серу и фосфор.

Во время плавки на качество стали оказывают влияние режимы окислительного периода (интенсивность и длительность кипения, состав шлака) и восстановительного периода (длительность, состав шлака, состав и количество раскислителей и модификаторов). Классификация способов улучшения качества литейных сталей представлена на рисунке 7.6.

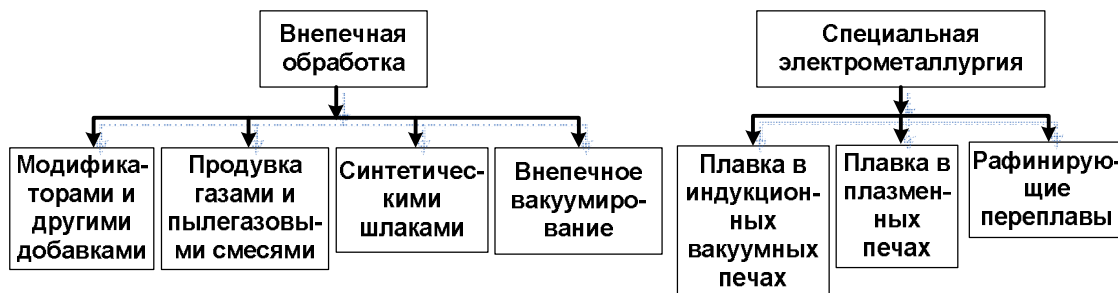


Рисунок 7.6 – Классификация способов улучшения качества литейных сталей

Широкими возможностями улучшения качества стали располагают методы внепечной обработки, позволяющие модифицировать сталь, уменьшать содержание вредных примесей и существенно влиять на содержание, состав, форму и распределение неметаллических включений.

Аналогичное, но более глубокое воздействие на качество стали обеспечивают методы специальной электрометаллургии, которые широко применяются в металлургии для получения высококачественных стальных слитков и начинают использоваться в сталелитейном производстве.

Наиболее простым видом внепечной обработки является модифицирование. Модифицированная углеродистая сталь приближается по свойствам к экономно-легированной, а модифицированная экономно-легированная к сталям, легированным дорогими и дефицитными добавками (Ni, Mo и т. п.). Модифицирование щелочными и щелочноземельными металлами позволяет существенно улучшать свойства стали. Особенно эффективно применение силицидов РЗЭ с иттрием. Введение комплексных модификаторов позволяет осуществлять раскисление, рафинирование и модифицирование, так как РЗЭ имеют повышенное сродство к кислороду и сере по сравнению с основными компонентами стали. Существенное влияние на качество стали оказывают нитридообразующие модификаторы. Многие модификаторы способствуют глобулизации неметаллических включений. Наиболее эффективны в этом отношении кальций и РЗЭ.

Продувка стали в ковше инертными газами через пористую огнеупорную пробку или через погруженные футерованные фурмы, вводимые в ковш сверху, позволяет снизить содержание газов и неметаллических включений. Например, продувка аргоном уменьшает содержание газов на 15–25%, увеличивает хладостойкость на 20–30%.

Обработка стали жидким синтетическим шлаком позволяет производить внепечную десульфурацию и очистку от неметаллических включений и газов. Обычно используют шлаки системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$, обладающие высокой рафинирующей способностью. Жидкий синтетический шлак готовят в специальной шлакоплавильной печи (ДПСШ–1), затем его сливают в ковш и выпускают в него сталь. Сталь перемешивается со шлаком, протекают реакции десульфурации, неметаллические включения также уносятся рафинирующим шлаком. В литейном производстве этот процесс применяют редко, и в тех случаях, когда требуется, низкое содержание серы, плавку производят в печи с основной футеровкой.

Эффективным методом улучшения качества стали является вакуумирование.

Применение вакуума для улучшения качества стали.

Применение вакуума для улучшения качества стали реализуется двумя путями: плавкой в вакууме и внепечным вакуумированием. Внепечное вакуумирование заключается в том, что жидкую сталь, полученную в любом сталеплавильном агрегате, перед ее разливкой выдерживают в вакууме, в результате чего происходит удаление растворенных в ней водорода и азота, так как при снижении давления растворимость газов в стали уменьшается (рисунок 7.7). Кроме того, происходит более полное взаимодействие между кислородом и углеродом, содержащимися в стали. Образующаяся окись углерода $[\text{C}]+[\text{O}]=\{\text{CO}\}$ переходит в газовую фазу. Равновесие реакции в результате снижения общего давления смещается вправо. Константа равновесия этой реакции $K_p = p_{\text{CO}}/a_{\text{CaO}}$, где p_{CO} – парциальное давление CO, которое определяется в виде доли от общего давления. Поэтому при вакуумировании p_{CO} резко снижается.

Различают четыре способа внепечного вакуумирования стали:

- 1 – в ковше в специальной камере: ковш со сталью помещают в камеру, которую затем герметично закрывают и создают в ней вакуум;
- 2 – при переливе металла из ковша в ковш: пустой ковш устанавливают в камеру, где создают и поддерживают вакуум, а ковш, из которого сливают металл, помещают с соответствующим уплотнением над вакуумной камерой;
- 3 – парциальное вакуумирование стали: металл пропускают через опускающуюся и поднимающуюся вакуумную камеру;
- 4 – вакуумирование в циркуляционной камере: циркуляция металла осуществляется в результате поддува нейтральным газом.

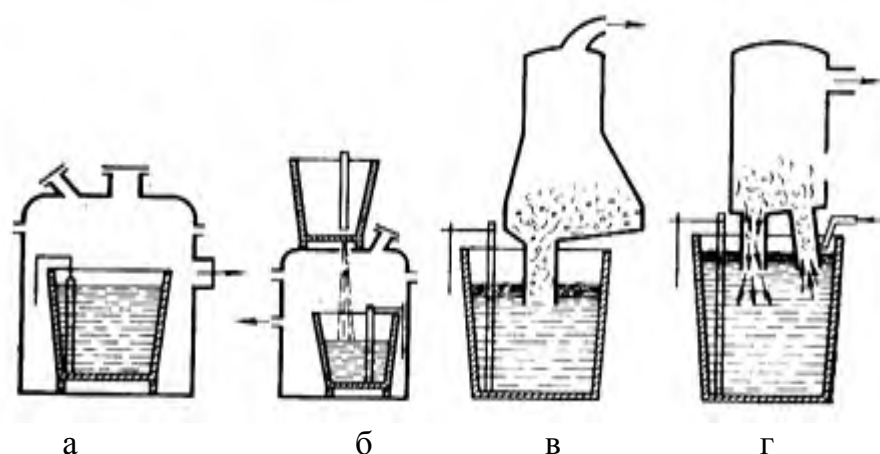


Рисунок 7.7 – Способы внепечного вакуумирования стали

Внепечной дегазацией металла в вакууме удается снизить содержание водорода на 40–60%, кислорода на 50–70%, азота на 5–10% от первоначального, а также уменьшить количество неметаллических включений. В результате вакуумной обработки стали повышается ее пластичность и ударная вязкость, хладостойкость и уменьшается склонность к образованию трещин.

Эффективность вакуумной обработки можно повысить, если всю плавку проводить в вакууме. Плавку в вакууме осуществляют обычно в индукционных вакуумных печах (ИВП). Сталь подвергается в ИВП глубокой дегазации, более полному раскислению благодаря длительной выдержке в вакууме и электромагнитному перемешиванию расплава. В процессе плавки из стали удаляются примеси легколетучих цветных металлов.

В ИВП могут быть выплавлены стали практически любого химического состава, за исключением тех, которые легированы легколетучими металлами. В ИВП обычно плавят жаропрочные и другие высоколегированные стали. Получить некоторые сплавы в обычных печах нельзя, поскольку возможности плавки на воздухе ограничены. Только применение плавки в вакууме позволило производить сплавы и стали сложного состава, содержащие такие высокорреакционные элементы, как алюминий, титан, бор и др.

Процессы, происходящие в жидком металле при плавке в вакууме, взаимосвязаны между собой и протекают одновременно. Раскисление металла углеродом, при котором происходит выделение пузырей окиси или двуокиси углерода, сопровождается выделением азота и водорода, всплыванием и восстановлением неметаллических включений, испарением примесей легколетучих компонентов и т. д. Использование этого процесса позволяет получать металл с низким содержанием кислорода. Поскольку продуктами раскисления углеродом являются окись и двуокись углерода, почти нерастворимые в металле, то они покидают зону реакции и выделяются из жидкого металла. Это выгодно отличает раскисление углеродом от использования других раскислителей, продукты взаимодействия которых с кислородом остаются в металле. Чем глубже вакуум, тем ниже давление CO , тем выше раскислительная способность углерода, тем меньше кислорода должно находиться в равновесии с данной концентрацией углерода.

Применяя в качестве раскислителя только углерод, не удастся полностью раскислить сталь, особенно низкоуглеродистую. Для глубокого раскисления стали необходимо применение металлических раскислителей.

При раскислении в вакууме требуется значительно меньшее количество присаживаемых металлических раскислителей, чем в условиях обычной открытой плавки, когда вводимые элементы окисляются шлаком и окислительной атмосферой.

Цикл плавки в ИВП можно разбить на несколько периодов: загрузка твердой шихты или заливка жидкого исходного металла; создание вакуума; расплавление шихты и присадка дополнительных порций шихты, не вошедших в тигель при первой загрузке; рафинирование жидкого металла; легирование металла и окончательное раскисление; разливка.

Продолжительность отдельных периодов, по данным работы, для печи с массой садки 0,5 т: откачка – 9 мин, загрузка – 5 мин; расплавление – 150 мин, рафинирование – 40 мин, выпуск – 5 мин, чистка тигля – 5 мин. Общая продолжительность – 3 ч 33 мин.

Для легирования, как правило, используют чистые материалы. В случае применения ферросплавов их необходимо перед загрузкой в печь прокалить для удаления адсорбированной влаги и газов и предотвращения сильных выплесков жидкого металла при попадании в ванну холодных кусков материала. В крупных ИВП применяют жидкую заливку. В качестве полупродукта используют полураскисленную сталь, выплавленную в дуговой печи. Холодный тигель подогревают газовой горелкой до 700 °С. Заливку жидкого металла производят с помощью специальной сливной трубы, установленной внутри печи. Она направляет струю стали непосредственно в тигель и уменьшает разбрызгивание металла при его попадании в разреженную атмосферу; давление перед этим понижают до 0,2–2,5 мм рт. ст. При работе на жидкой завалке продолжительность плавки сокращается.

Наиболее ответственным периодом является рафинирование, которое включает технологические операции, необходимые для удаления из металла растворимых газов, углерода и серы. В этот период проводится раскисление металла углеродом как за счет того углерода, который содержится в шихте, так и путем присадки определенных добавок углерода в виде графита, чугуна, углеродистых ферросплавов. Выдержка при раскислении углеродом продолжается до полного прекращения кипения ванны. Выдержка под вакуумом способствует удалению из металла водорода, азота и кислорода.

На заключительном этапе плавки для достижения минимальных концентраций кислорода в металле применяют металлические раскислители: алюминий совместно с церием, кальций или магний в виде лигатур. При раскислении лигатурами необходимо над металлом создавать повышенное давление аргона для предотвращения выбросов вследствие бурно протекающей реакции раскисления.

Легирование в ИВП проводят в период выдержки. Порядок присадки легирующих элементов определяется их физико-химическими свойствами. С шихтой вводят только некоторые тугоплавкие присадки (W, Mo). После расплавления и раскисления ванны присаживают хром, ванадий. В конце периода выдержки вводят титан и алюминий, непосредственно перед выпуском – РЗМ, кальций, магний, бор.

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 В каких плавильных агрегатах выплавляют сталь в литейных цехах?
- 2 Опишите технологию выплавки стали в мартеновских печах и конвертерах.
- 3 Опишите технологию выплавки стали в электродуговых печах.
- 4 Опишите технологию выплавки стали в индукционных тигельных печах.
- 5 В чем заключается выплавка высококачественных сталей?
- 6 Как классифицируют способы улучшения качества литейных сталей?
- 7 Дайте характеристику способам вакуумирования жидкой стали.

Глава. Изготовление отливок в разовых песчаных формах

8.1 Основные этапы производства отливок

Отливка получается в результате заполнения полости литейной формы расплавленным жидким металлом. После заливки жидкий металл охлаждается в форме и затвердевает. Для извлечения охлажденной отливки формы разрушают. Эти формы называют разовыми. Их изготавливают обычно из формовочных смесей, основными составляющими которых являются кварцевый песок и огнеупорная глина.

Модель – приспособление для получения в литейной форме отпечатка, соответствующего конфигурации и размерам отливки. Модели делают из дерева, металла, гипса, пластмасс и других материалов.

Процесс изготовления литейных форм называется формовкой. В литейном производстве применяется ручная и машинная формовка. Ручная формовка используется в индивидуальном и мелкосерийном производстве. Формы в этом случае изготавливаются в основном по деревянным моделям. В поточно-массовом и серийном производстве формы изготавливаются на формовочных машинах по металлическим моделям.

Стержни получают с помощью стержневых ящиков или шаблонов. Готовые стержни подвергаются сушке в специальных сушилах с целью увеличения газопроницаемости, общей и поверхностной прочности, а также уменьшения газотворной способности.

Стержни перед их установкой в форму окрашивают краской, состоящей из огнеупорных материалов: графита, цирконового песка. После отделки полуформ их собирают. Перед сборкой сырые формы припыливают и окрашивают для получения чистой поверхности отливки. Сырые формы припыливают графитом, тальком, древесным углем и др. При формовке по-сухому поверхность формы окрашивают краской и сушат. Если отливка имеет полость, то в форму перед сборкой устанавливают стержень. Затем форму собирают и скрепляют опоки болтами или скобами.

Металл, залитый в форму, затвердевает, затем охлаждается уже в твердом состоянии.

После охлаждения отливки выбивают из форм. Выбивка отливок производится только после остывания их до определенной температуры, так как при высоких температурах сплавы недостаточно прочны и отливка может разрушиться. Выбивка отливок из опок осуществляется на выбивных установках или вручную.

Отливки имеют обычно много приливов (литников, выпоров, заусенцев, заливов металла и т. д.). Кроме того, поверхность отливок загрязнена пригоревшей к ней формовочной смесью. Поэтому отливки подвергаются обрубке и очистке. Отливки очищаются в дробеструйных и дробеметных установках, гидравлических, пескогидравлических и очистных барабанах.

Затем производят контроль отливок: проверяют размеры отливок, герметичность, наличие внутренних и внешних дефектов (усадочных раковин, газовых раковин, трещин и др.), механические свойства и структуру металла. Отливки, имеющие дефекты (шлаковые включения, местные песочные, усадочные и газовые раковины, а иногда трещины), исправляют различными способами: газовой и электрической заваркой, пропиткой различными смолами, замазками и др.

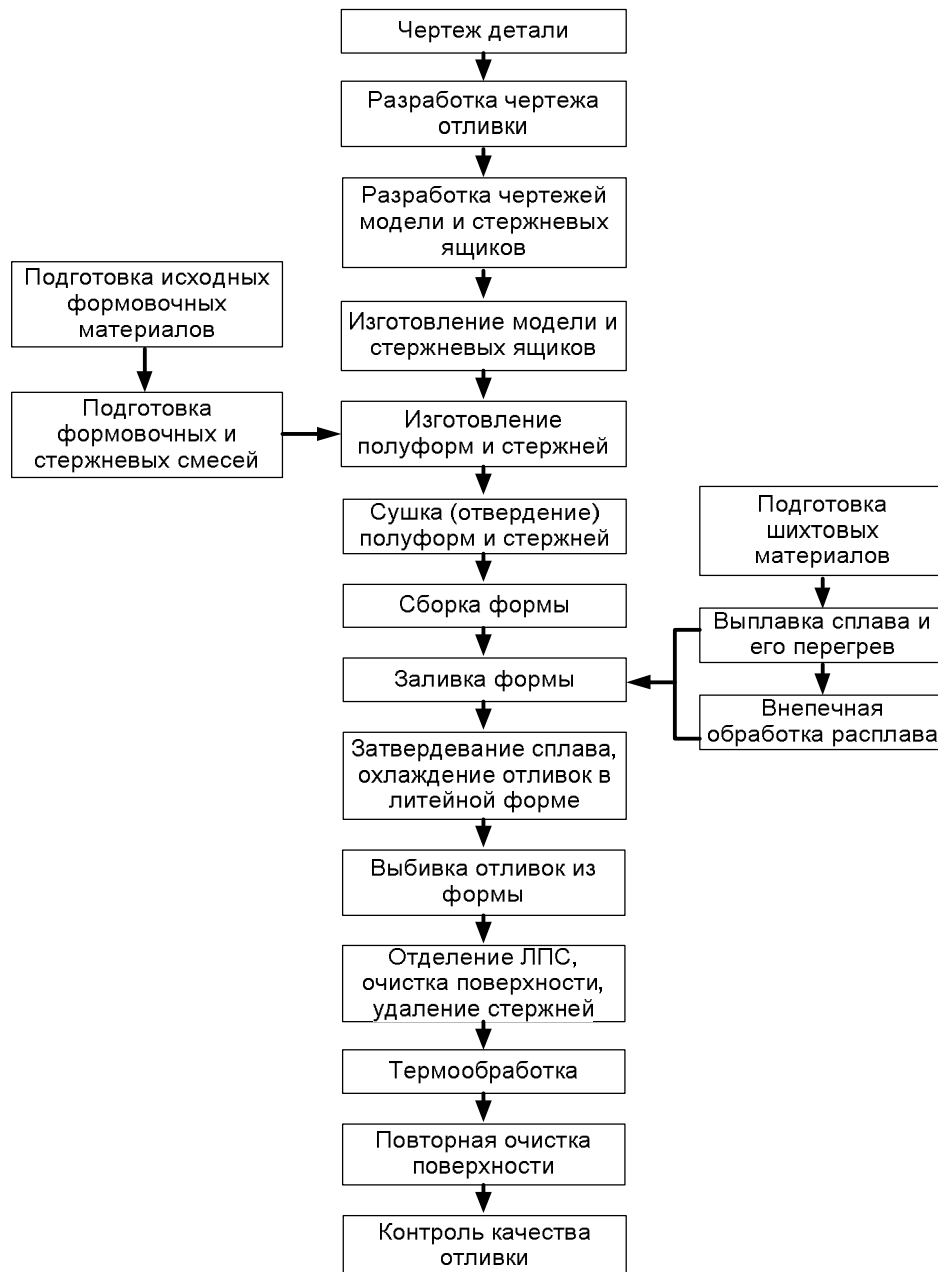


Рисунок 8.1 – Технологический процесс получения отливки в разовой песчаной форме

Принятые ОТК (отдел технического контроля) или мастером литейного цеха отливки отправляются на склад готовых изделий, а оттуда поступают на механическую обработку. Некоторые отливки перед отправкой их в механический цех окрашивают для того, чтобы предотвратить коррозию.

При механической обработке литых заготовок им придается окончательная геометрическая форма, требуемая точность и шероховатость поверхности, предусмотренные чертежами и техническими условиями на готовую деталь. Это наиболее трудоемкий процесс в машиностроительном производстве, так как затраты на механическую обработку составляют 40-60% всех затрат на изготовление машин. Поэтому необходимо стремиться изготавливать отливки с минимальными припусками на механическую обработку.

8.2 Формовочные материалы

8.2.1 Пески

К формовочным пескам относят горные породы, существующие в природных условиях в виде россыпей, образованных зернами тугоплавких, прочных и твердых минералов (таблица 8.1). В литейном производстве наиболее часто используют кварцевые пески.

Таблица 8.1 – Содержание глинистой составляющей, кремнезема и вредных примесей в формовочных песках

Класс	Наименование	Содержание глинистой составляющей, %, не более	Содержание кремнезема SiO ₂ , %, не менее	Содержание вредных примесей	
				оксидов щелочноземельных и щелочных металлов, %, не более	оксида железа Fe ₂ O ₃ , %, не более
Об1К	Обогащенный кварцевый	0,2	98,5	0,4	0,2
Об2К		0,5	98	0,75	0,4
Об3К		1	97,5	1	0,6
1К	Кварцевый	2	97	1,2	0,75
2К		2	96	1,5	1
3К		2	94	1	1,5
4К		2	90	-	-
Т	Тощий	10	-	-	-
П	Полужирный	20	-	-	-
Ж	Жирный	30	-	-	-
ОЖ	Очень жирный	50	-	-	-

Кварц, являющийся одной из форм существования кремнезема (SiO₂), обладает высокой огнеупорностью (1713 °С), прочностью, твердостью (7 по шкале Мооса) и низкой химической активностью.

Недостатками кварца, как основы формовочных и стержневых смесей, являются его аллотропические изменения при нагреве и охлаждении. При температуре 575 °С β-кварц переходит в α-кварц, что сопровождается увеличением его объема на 2,4%. При охлаждении нагретого α-кварца происходит обратное превращение с сокращением объема. В каждом производственном цикле при нагреве от заливаемого в форму металла и последующем охлаждении эти изменения объема при сравнительно невысокой теплопроводности кварца приводят к возникновению напряжений и растрескиванию кварцевых зерен и обогащению смеси пылевидными частицами.

В целях повторного использования отработанной смеси (восстановления свойств) после каждого производственного цикла в нее вводят 3–15% свежих кварцевых песков.

Природные кварцевые пески содержат примеси оксидов железа, полевого шпата, слюды и других минералов. Полевой шпат и слюда содержат оксиды щелочных и щелочноземельных металлов. Все эти примеси являются вредными, так как снижают огнеупорность кварца, образуя с ним и оксидами заливаемого металла сложные легкоплавкие силикаты типа $p\text{SiO} \cdot m\text{FeO} \cdot p\text{Na}_2\text{O}$. Поэтому содержание вредных примесей, особен-

но в песках, предназначенных для использования при литье стали, чугуна и других высокотемпературных сплавов, ограничивается.

В природных кварцевых песках часто содержится глина. Если она имеет хорошие связующие свойства, то такая примесь может рассматриваться как полезная.

Наряду с минералогическим составом важным свойством песка является его зерновое строение, которое характеризуется размером, формой и однородностью зерен. От зернового строения зависят теплофизические, механические и технологические свойства смеси, а также его газопроницаемость. Перед зерновым анализом от песка отделяется отмучиванием в воде глинистая составляющая, к которой относятся все частицы размеров $\leq 0,02$ мм.

Формовочные пески подразделяют на классы в зависимости от содержания глинистой составляющей, кремнезема и вредных примесей.

Обогащенные кварцевые пески содержат минимальное количество глинистых подавляющих и вредных примесей, в кварцевых песках их несколько больше. Пески, содержащие 2–50% глинистой составляющей, называют глинистыми. Материалы, содержащие более 50% глинистой составляющей, относятся к глинам.

После определения глинистой составляющей определяют крупность и однородность зерен песчаной основы. Для этого остаток, получившийся после отмучивания глины, просеивают на ситах.

Каждому сигу присвоен номер, соответствующий размеру стороны ячейки, выраженный в миллиметрах:

Номер сита 2,5; 1,6; 1,0; 0,63; 0,4; 0,315; 0,2; 0,16; 0,1; 0,063; 0,05;

Размер стороны

ячейки, мм 2,5; 1,6; 1,0; 0,63; 0,4; 0,315; 0,2; 0,16; 0,1; 0,063; 0,05.

Рассев носка производится на приборе, который сообщает стопке сит с навеской песка вращательные движения с периодическими встряхиваниями. После окончания просева (через 15 мин) навеску песка на каждом сите взвешивают. В зависимости от размера зерен основной фракции пески подразделяют на группы (таблица 8.2).

Таблица 8.2 - Зерновой состав песков

Группа	Наименование	Номера смежных сит, на которых остаются зерна основной фракции		
		1	2	3
0,63	Грубый	1	0,63	0,4
0,4	Очень крупный	0,63	0,4	0,315
0,315	Крупный	0,4	0,315	0,2
0,2	Средний	0,315	0,2	0,16
0,16	Мелкий	0,2	0,16	0,1
0,1	Очень мелкий	0,16	0,1	0,063
0,063	Тонкий	0,1	0,063	0,05
0,05	Пылевидный	0,063	0,05	Тазик

Размер зерна определяется размером стороны ячейки сита, на котором остается зерно после прохождения через предыдущее сито. Основной фракцией песка считается наибольшая сумма остатков на трех смежных ситах. Группа песка обозначается номером среднего сита основной фракции. В зависимости от величины остатка основной фракции на крайних ситах пески делятся на две категории—А и Б. К категории А отно-

сятся пески с остатком основной фракции на кранном верхнем сите большем, чем на крайнем нижнем сите, а к категории Б - пески с остатком на крайнем нижнем сите большем, чем на крайнем верхнем.

Необогащенные кварцевые пески по характеру распределения зерен подразделяют на пески с сосредоточенной зерновой структурой, у которых преобладающая масса зерен (не менее 70%) остается на трех смежных ситах, и пески с рассредоточенной зерновой структурой, у которых преобладающая масса зерен на трех ситах составляет не менее 60%.

Пески обогащенные и природные полужирные, жирные и очень жирные должны иметь сосредоточенную зерновую структуру.

Форма зерен песка может быть округлой, полукруглой и остроугольной.

При маркировке песков на первое место ставят класс, затем группу и категорию, например, 2К02А. Песок этой марки относится к классу 2К, с основной фракцией средней крупности, оставшейся на ситах 0315, 02 и 016. Категория А показывает, что на сите 0315 остаток больше, чем на сите 016.

Иногда вместо кварцевых песков применяют другие материалы, например, хромистый железняк, хромомагнетит, циркон и др. Формовочные и стержневые смеси, в состав которых входят эти материалы, имеют повышенные теплоаккумулирующую способность и химическую инертность по отношению к заливаемым металлам и их оксидам. При заливке металла в формах возникают меньшие температурные напряжения и изменения объема, так как у этих материалов отсутствуют аллотропические превращения. Использование этих материалов позволяет получать, например, крупные и массивные стальные отливки с чистой поверхностью.

8.2.2 Глины

Формовочные глины, используемые для связывания зерен песка, являются горными породами, которые в своем естественном состоянии после увлажнения обладают высокой пластичностью. Вокруг глинистых частиц, несущих на своей поверхности электрический заряд, образуются гидратные оболочки, обеспечивающие легкое скольжение части относительно друг друга при сохранении их сцепления и без нарушения сплошности материала при деформации. Количество удерживаемой воды зависит от основного минерала глины, размера частиц этого минерала и от присоединенных к нему веществ. Чем больше воды на поверхности способна удерживать глина, тем выше ее связующая способность и пластические свойства.

В зависимости от минералогического состава глины подразделяют на каолиновые (К), бентонитовые (Б) и полиминеральные (П).

В каолиновых глинах основным минералом является каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, имеющий слоистую кристаллическую решетку. На границах каждого слоя с одной стороны имеются ионы кислорода, а с другой – гидроксильные группы. Валентные связи между соседними слоями отсутствуют, и их взаимодействие определяется силами Ван-дер-Ваальса.

Вода окружает многослойный кристалл гидратной оболочкой. Чем меньше отдельные кристаллы, входящие в состав глины, тем больше общий объем гидратных оболочек и тем выше ее связующая способность.

По краям пластин каолинита всегда имеются группы SiO_4^{4-} , неиспользованные валентности которых обуславливают химическую активность пограничного слоя кристалла. В природных условиях к анионам SiO_4^{4-} присоединяются катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ,

Al^{3+} и др. При увлажнении происходит диссоциация, анионом является сам кристалл каолинита, а катионами – присоединившиеся элементы. Анионы и катионы при этом удерживают вокруг себя некоторое количество воды. Количество удерживаемой воды зависит от свойств катионов. Наибольшее количество воды удерживают глины, содержащие ионы Na^+ , затем идут глины, содержащие K^+ , и далее глины, содержащие ионы щелочноземельных металлов.

Все основные технологические свойства формовочных глин определяются их минералогическим составом, размером частиц, количеством и составом присоединенных катионов.

При нагреве в глинах протекают процессы, вызывающие постепенное и скачкообразное изменение их связующих свойств. Прочность формовочных смесей, в состав которых входит глина, при нагреве до $100\text{ }^\circ\text{C}$ и несколько выше увеличивается, что объясняется повышением сцепления между глинистыми частицами по мере удаления гигроскопической влаги. В интервале $350\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$ из глины удаляется кристаллизационная влага, и она теряет свои связующие свойства.

Бентонитовые или монтмориллонитовые глины обладают более высокой связующей способностью. Основным минералом является монтмориллонит $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$. Эти глины также имеют слоистое строение, но по границам слоев расположены только ионы кислорода, и связь между соседними слоями более слабая по сравнению с каолиновыми глинами. Молекулы воды не только находятся на поверхности кристалла, но и между его слоями. Поэтому кристаллы обладают способностью к внутрикристаллическому набуханию: расстояние между слоями кристалла увеличивается примерно в 3 раза.

По прочностным свойствам формовочные глины во влажном состоянии делят на группы: прочносвязующие (П), среднесвязующие (С) и малосвязующие (М). При этом предел прочности при сжатии для стандартной смеси, в состав которой входит бентонитовая глина, должен быть не менее $1,3 \cdot 10^5$ Па (для П); $1,1 \cdot 10^5$ Па (для С); $0,9 \cdot 10^5$ Па (для М) и для каолиновой глины соответственно $1,1 \cdot 10^5$ Па; $0,8 \cdot 10^5$ Па; $0,5 \cdot 10^5$ Па.

По прочностным свойствам в сухом состоянии глины подразделяют на подгруппы: прочносвязующие (1), среднесвязующие (2) и малосвязующие (3). При этом предел прочности при сжатии для стандартной смеси в сухом состоянии, в состав которой входит бентонитовая глина, должен быть не менее $5,5 \cdot 10^5$ Па; $3,5 \cdot 10^5$ Па; $3 \cdot 10^5$ Па и для каолиновой глины соответственно $4,5 \cdot 10^5$ Па; $3 \cdot 10^5$ Па; $2 \cdot 10^5$ Па.

По содержанию вредных примесей (Fe_2O_3 , Na_2O+K_2O , $CaO+MgO$) глины делят на группы с низким (T_1), средним (T_2) и высоким (T_3) содержанием примесей. При этом массовая доля этих примесей не должна превышать соответственно 6; 12,5 и 21%. Чем меньше в глине примесей, тем выше ее термохимическая устойчивость.

Маркируют глины в зависимости от минералогического состава, прочностных свойств во влажном и сухом состояниях и количества вредных примесей. Так, например, марка БПТ₂ означает, что глина бентонитовая, прочносвязующая во влажном и сухом состояниях и со средним содержанием вредных примесей.

Вспомогательные материалы. Формовочные и стержневые смеси, в которых связующим является глина, обладают рядом недостатков. Для получения высокой прочности смеси в нее необходимо вводить большие количества глины и воды, что значительно снижает газопроницаемость смеси и увеличивает пригар на отливках. Такие смеси характеризуются плохими податливостью и выбиваемостью.

Для улучшения свойств смеси в нее взамен глины вводят вещества, называемые связующими (таблица 8.3).

Таблица 8.3 – Классификация связующих материалов

Класс	Группа	Обозначение	Название	Характер затвердевания	Удельная прочность, 10^5 Па/%
А	1	А-1	Синтетические смолы, ПК-104 (пудвербакелит), высыхающие масла, олифа, льняное масло, П	Необратимый	>5
	2	А-2	Смолосодержащие продукты и их комбинации с органическими водными материалами, ГТФ, ДП, БК, 4ГУ	Промежуточный	3-5
	3	А-3	Смолосодержащие продукты, пеки (древесный, торфяной, каменноугольный), канифоль	Обратимый	<3
Б	1	Б-1	Синтетические смолы, МФ -7, М	Необратимый	>5
	2	Б-2	Коллоидные растворы органических веществ и эмульсии неводной органической фазы в водной среде с растворенными органическими материалами, СП, СБ, КТ, декстрин	Промежуточный	3-5
	3	Б-3	Коллоидные растворы органических веществ, ССБ, патока	Обратимый	<3
В	1	В-1	Жидкое стекло	Необратимый	>5

Связующие должны обеспечивать следующие свойства:

1 – высокую общую и поверхностную прочность форм и стержней после сушки или другой обработки;

2 – высокую текучесть, хорошую газопроницаемость и низкую газотворную способность;

3 – высокую податливость и выбиваемость смесей за счет снижения их прочности к моменту начала усадки отливки;

4 – отсутствие прилипания смесей к моделям и стержневым ящикам.

Перечисленные требования должны выполняться при введении сравнительно малых количеств связующего (0,5–6%). Основными классификационными признаками этих материалов являются их химическая природа, способность сообщать смесям прочность, отношение к воде, их гидрофильность и гидрофобность.

Деление связующих на классы (А, Б, В) позволяет ориентировочно предопределять свойства смесей: их прочность во влажном состоянии, текучесть, податливость, выбиваемость, а также возможность комбинации связующего с глиной. К классу А относятся органические связующие, не растворимые или не смачиваемые водой; к классу Б – органические связующие, растворимые или смачиваемые водой, к классу В – неорганические связующие, растворимые или смачиваемые водой.

По удельной прочности $\sigma_{уд}$ связующие всех классов делят на три группы:

$$\sigma_{уд} = \frac{100\sigma}{p(100 - v)},$$

где σ – предел прочности при растяжении сухого образца (в расчете на 1% связующего);
 p – общее количество связующего, вводимого в смесь;
 σ – содержание растворителя в связующих.

В состав испытываемой смеси вводят оптимальное количество связующего, определяемое ГОСТами или техническими условиями.

Удельная прочность зависит от характера затвердевания пленок связующего. Если при затвердевании протекают глубокие необратимые химические изменения, например, окисление, полимеризация или поли конденсация молекул, то удельная прочность связующих более $5 \cdot 10^5$ Па/% и соответственно при обратимом затвердевании удельная прочность менее $3 \cdot 10^5$ Па/%, Некоторые связующие обладают промежуточным характером затвердевания, при котором одновременно протекают обратимые и необратимые процессы.

Органические связующие (А, Б), имеющие широкий диапазон технологических свойств, при высоких температурах сравнительно легко разлагаются и обеспечивают хорошую податливость и выбиваемость. Неорганические связующие (В) хорошо выдерживают воздействия высоких температур, но имеют более низкую податливость и выбиваемость.

Синтетические смолы (А-1 и Б-1) в настоящее время находят широкое применение при изготовлении стержней, твердеющих в нагреваемой и холодной оснастке. Фенол-формальдегидные и фурановые смолы, твердеющие в результате процессов поли конденсации, имеют высокую термостойкость, используются в стальном литье; менее термостойкие карбамидные смолы – в цветном литье.

Олифа и льняное масло (А-1) высыхают вследствие окисления и полимеризации.

Жидкое стекло (В-1), представляющее собой водный коллоидный раствор силиката натрия, применяют для изготовления формовочных и стержневых смесей с последующей тепловой и химической сушкой форм и стержней. Основной характеристикой жидкого стекла является его модуль M – отношение числа грамм-молекул диоксида кремния SiO_2 к числу грамм-молекул оксида натрия Na_2O . Обычно $M = 2 \div 3$. Чем выше модуль, тем быстрее идет затвердевание смесей с жидким стеклом, но конечная прочность смеси тем выше, чем ниже модуль. Жидкое стекло с низким ($M = 2$), средним ($M = 2,5$) и высоким ($M = 3$) модулями применяют для форм и стержней, твердеющих соответственно при тепловой обработке, продувке углекислым газом и выдержке на воздухе.

Затвердевание жидкого стекла с высоким модулем характеризуется процессом последовательного перехода водного коллоидного раствора сначала в золь, а затем в твердый кремнегель. Жидкое стекло с низким модулем твердеет преимущественно с образованием геля бисиликата натрия ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$).

Повышение податливости и улучшение выбиваемости жидко-стекляных смесей достигают введением сахаросодержащих добавок (гидрола). Введение в смеси сложных эфиров органических и неорганических кислот (ацетатов глицерина) позволяет снизить необходимое количество жидкого стекла на 30% и существенно увеличить выбиваемость смесей. Положительным свойством жидкого стекла является отсутствие вредных выделений во время заливки форм.

Древесный пек и канифоль (А-3), сульфитно-спиртовая брага (ССБ) и патока (15-3) имеют относительно невысокую удельную прочность и чаще применяются совместно с другими материалами.

Широкое распространение на практике получили комбинированные связующие (А-2 и Б-2), которые получают растворением, смешиванием и эмульгированием. Растворе-

ние используют, когда связующие имеют одинаковую химическую природу и растворяются в одинаковых растворителях. Смешивать можно связующие разной химической природы (органические и неорганические), но обязательно водные с водными, а неводные – с неводными.

При эмульгировании дополнительно вводится поверхностно-активное вещество (ПАВ), которое, адсорбируясь на поверхности капель или частиц, препятствует соответственно их слиянию или сцеплению, т. е. разделению (расслоению) системы на две отдельные фазы. Эмульсии, полученные таким образом, могут представлять собой капли или частицы неводного связующего, распределенные в воде и стабилизированные каким-либо ПАВ, и капли воды, распределенные в неводном связующем. Примером эмульсии первого типа может служить связующее СП (группы Б-2), в котором капли окисленного петролятума (5%), представляющего собой масло на основе нефтепродуктов, распределены в воде и стабилизированы сульфитно-спиртовой бардой (95%), которая сама является связующим.

В связующих групп А-2 и Б-2 часто в небольших количествах содержится глина, придающая смесям прочность в сыром состоянии. Применение комбинированных связующих снижает расход дефицитных и дорогостоящих связующих и позволяет получать стержневые смеси заданной прочности в сухом и сыром состояниях, с высокой газопроницаемостью и минимальной газотворностью.

Для улучшения технологических, механических, теплофизических и других свойств в смеси вводят добавки. В смеси для стального литья вводят пылевидный кварц, который, располагаясь между зернами песка, уменьшает пористость смеси и увеличивает ее теплоаккумулирующую способность. Это приводит к более раннему образованию твердой корки на поверхности отливки и снижению механического и химического пригаров. Уменьшение проходного сечения пор также способствует уменьшению пригара.

В формовочные смеси для чугуна, заливаемого во влажные формы, вводят каменноугольную пыль, которая по время заливки газифицируется и создает в форме более восстановительную атмосферу, препятствующую окислению металла и образованию на отливках пригара.

В формовочные смеси для ответственного чугунного литья с целью повышения поверхностной прочности сырых форм вводят до 0,1% крахмалита (кукурузного крахмала), что снижает брак отливок по засорам.

С целью предотвращения воспламенения магниевых сплавов в формовочные смеси вводят добавку ВМ, в состав которой входят борная кислота, техническая мочеви́на и серноокислый алюминий. На поверхности магниевого сплава образуются плотные пленки, защищающие его от окисления кислородом воздуха и парами воды из формы. В стержневые смеси с этой же целью добавляют серу (0,25–1%). Выделяющиеся газообразные продукты снижают концентрацию кислорода и паров воды вокруг отливки и предохраняют ее от возгорания.

При изготовлении чугунных отливок в смеси для сухих форм добавляют опилки, которые при сушке уменьшаются в объеме, а при заливке металла выгорают, образуя дополнительные поры. В результате формы имеют повышенную газопроницаемость, податливость и выбиваемость.

Добавки можно вводить для повышения теплопроводности, текучести смесей, устранения их прилипания к модельной оснастке, а также в других целях. Поверхностно-активные вещества позволяют получать смеси с принципиально новыми свойствами. Так, например, введение в смеси с жидким стеклом ПАВ ДСРАС или контакта Петрова в количестве до 0,1% переводит смесь из сыпучего в жидкоподвижное состояние за счет

снижения поверхностного натяжения жидкой составляющей и образования в межзеренных пространствах песка мелкодисперсной пены. Жидкие смеси можно заливать в опоку или стержневой ящик без использования обычных формовочных и стержневых машин, уплотняющих смесь. Смесь затвердевает через 20–40 мин после введения в нее отвердителя, содержащего двукальциевый силикат $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Эти смеси благодаря своим качествам получили в настоящее время широкое применение.

8.2.3 Формовочные смеси

Состав формовочных смесей определяется маркой литейного сплава, его температурой перед разливкой по формам, размерами и массой получаемых отливок, способом изготовления форм, характером производства и другими факторами.

Экономически целесообразно получать отливки в сырых формах. Сухие формы применяют при изготовлении крупных, массивных или сложных по конфигурации отливок в тех случаях, когда в сырых формах не удастся получить качественные изделия. Смеси для сырых форм имеют влажность 4–6%, содержат 7–12% глины прочносвязующей во влажном состоянии. Содержание глины может быть снижено до 4% при использовании бентонитов. Предел прочности при сжатии сырых смесей обычно составляет $(0,3–0,8)\cdot 10^5$ Па.

В массовом производстве при изготовлении форм методом прессования под повышенным давлением и изготовлении безопочных форм с вертикальным разъемом применяют высокопрочные смеси, предел прочности которых при сжатии достигает $2,1\cdot 10^5$ Па.

При получении отливок в сухих формах содержание прочно-связующей глины в высушенном состоянии доходит до 16%, влажность смеси составляет 5–9%.

Формовочные смеси готовят из различных песков и глин. Формовочные смеси для получения стальных отливок (температура заливки 1550 °С) должны содержать пески классов 1К и 2К и глины группы T_1 с высокой термохимической устойчивостью (с низким содержанием примесей). При изготовлении крупных чугунных отливок (температура заливки 1350 °С) можно использовать пески классов 3К и 4К и глины группы T_2 со средней термохимической устойчивостью (со средним содержанием примесей). Для мелких, и средних чугунных отливок и отливок из цветных сплавов вместо кварцевых можно применять глинистые пески класса П, имеющие более низкую огнеупорность.

Формовочные смеси подразделяют на единые, облицовочные и наполнительные. В массовом производстве применяют единые смеси, в единичном и мелкосерийном производстве для изготовления крупных форм—две смеси: облицовочную, наносимую на поверхность модели, и наполнительную, заполняющую остальной объем формы.

Единые смеси должны обладать высокими свойствами, потому что они соприкасаются с жидким металлом. Степень освежения единых смесей (5–15%) значительно меньше, чем у облицовочных (20–100%), так как вводимые в единую смесь свежие пески и глины при одинаковом их расходе распределяются по всему объему формы, а не только в облицовочном слое. Степень освежения смесей зависит от количества заливаемого в форму металла, его температуры, а также от безвозвратных потерь смеси в процессе производства отливок.

Облицовочный слой смеси (толщина 40–100 мм), непосредственно контактирующий с заливаемым в форму металлом, подвергается воздействию высоких температур, воспринимает гидравлический удар и давление металла, обеспечивает необходимую конфигурацию и чистоту поверхности. Из этих соображений облицовочные смеси

должны обладать повышенными физико-механическими свойствами, что достигается введением в их состав большего количества свежих материалов (песков и глин).

Наполнительные смеси отделены от металла слоем облицовочной смеси, поэтому к ним в основном предъявляют требования по газопроницаемости и прочности, которые должны быть не ниже, чем у облицовочных смесей. В наполнительные смеси свежие материалы не вводят.

8.2.4 Стержневые смеси

К стержневым смесям предъявляют более высокие требования, чем к формовочным в отношении прочности, газопроницаемости, газотворности, податливости, выбиваемости и огнеупорности, так как во время заливки и охлаждения металла в форме стержни в большей мере соприкасаются с металлом и интенсивнее прогреваются. Стержневые смеси выбирают в зависимости от конфигурации и размеров стержней, положения их в форме, заливаемого сплава и толщины стенки отливки.

Стержни подразделяют на пять классов. К первому классу относят стержни сложной конфигурации, с очень тонкими сечениями, имеющие небольшое число тонких знаков. Стержни со всех сторон окружены металлом. В высушенном состоянии они должны иметь высокую прочность и газопроницаемость. Это достигается введением в смесь небольшого количества связующего А-1.

Стержни второго класса наряду с тонкими ребрами и выступами имеют массивные части и развитые знаки. Вследствие более легкого отвода газов из стержней через знаки допустимо большее количество связующего. Поэтому можно применять связующие А-2. Для придания стержням достаточной прочности во влажном состоянии в смеси вводят 3–5% глины.

Стержни третьего класса имеют конфигурацию средней сложности. Обычно это центровые стержни. Они должны обладать средней прочностью во влажном и высушенном состояниях. Эти требования выполняются при введении в смесь комбинированных связующих А-2 и Б-2. Можно вводить связующие А-3, Б-3 совместно с глиной.

К четвертому классу относят стержни несложной конфигурации. В смесях используют водные связующие классов Б и В.

Стержни пятого класса – массивные стержни, образующие большие полости в крупных отливках. Основным связующим в смесях является глина (7–10%), так как стержни мало прогреваются и органические материалы в них не сгорают и не разлагаются. Для увеличения податливости в смеси добавляют опилки. Для стержней первого и второго классов применяют кварцевые пески; для стержней третьего и четвертого классов можно использовать менее дефицитные глинистые пески и вводить до 60% отработанной смеси. При изготовлении стержней, твердеющих в нагреваемой или холодной оснастке при наличии катализатора, используют обогащенные пески. Предел прочности при сжатии смеси во влажном состоянии для стержней первого–пятого классов возрастает от $(0,03–0,06) \cdot 10^5$ до $(0,2–0,35) \cdot 10^5$ Па, предел прочности при растяжении высушенной смеси снижается с $(7–10) \cdot 10^5$ до $(0,8–1,5) \cdot 10^5$ Па.

Для смесей, твердеющих в нагреваемой оснастке, предел прочности при растяжении равен $20 \cdot 10^5$ Па (смеси с 2,7% смолы КФ-90) и более.

Таблица 8.4 – Составы и свойства формовочных смесей

Сплавы	Состояние формы	Состав смеси, %					
		единой			облицовочной		
		Песок и глина	Отработанная смесь	Добавки	Песок и глина	Отработанная смесь	Добавки
1	2	3	4	5	6	7	8
Стали	Сырая	10-20	90-80	-	25-50	75-50	0-1 ССБ
	Сухая	-	-	-	50-100	50-0	0-20 пылевидного кварца, 0-1,5 ССБ
Чугуны	Сырая	5-15	95-85	0,5-1,5 каменного угля	20-60	80-40	2-8 каменного угля
	Сухая	-	-	-	40-60	60-40	0-4 опилок
Медные	Сырая	7-10	93-90	1-1,5 мазута	20-60	80-40	1-1,5 мазута
	Сухая	-	-	-	20-40	80-60	-
Алюминиевые	Сырая	8-10	92-90	-	20-90	80-10	-
Магниевые	Сырая	5-10	95-90	4-8 фтористой присадки	-	-	-

Продолжение таблицы 8.4

Сплавы	Зерновой состав песка	Содержание глины, %	Влажность, %	Газопроницаемость	Предел прочности, 10^5 Па	
					при сжатии сырых образцов	при растяжении сухих образцов
1	9	10	11	12	13	14
Стали	02А-02Б	10-12	4-5	80-120	0,4-0,6	-
	02Б-0315А	7-15	6-8	70-120	0,5-0,7	0,8-1,5
Чугуны	01А-0315Б	8-19	4-6	30-100	0,3-0,7	-
	02А-04А	12-16	6-8	60-100	0,5-0,8	0,8-2
Медные	016А-01А	8-12	4-5,5	30-50	0,3-0,5	-
	016А-01А	10-15	5,5-7	30-50	0,4-0,6	0,8-1,2
Алюминиевые	016А-01А	8-10	4,5-5,5	20-40	0,3-0,5	-
Магниевые	01А- 0063А	5-6	-	20-40	0,4-0,8	-

8.3 Приготовление формовочных и стержневых смесей

Перед приготовлением формовочных и стержневых смесей исходные материалы подвергают специальной обработке.

Пески, поступающие на склад литейного цеха, сушат при температуре ~ 250 °С в печах барабанного типа или в установках для сушки в кипящем слое (рисунок 8.2). Ис-

ходный песок подается на решетку 4. Дымовые газы при температуре 1000 °С направляются под решетку под избыточным давлением и образуют с песком пневмокипящий слой. Интенсивное перемешивание обеспечивает эффективный теплообмен между горячими газами и частицами песка, которые быстро высушиваются. Расширение конического резервуара 3 способствует снижению скорости движения песчинок и их оседанию. Сухой песок вытекает через желоб 5, а влажный – непрерывно поступает по транспортеру 1 через воронку 2.

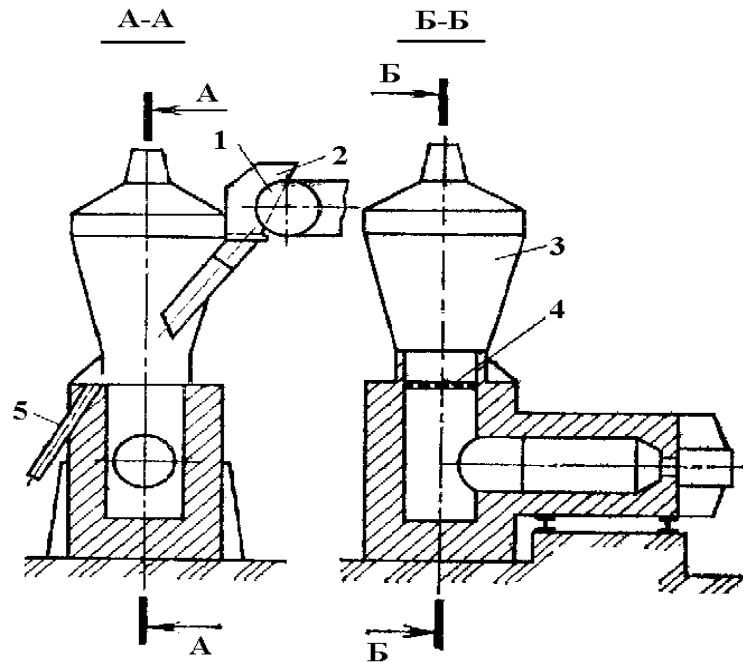


Рисунок 8.2 - Установка для сушки песка в кипящем слое

Высушенный песок охлаждается до нормальной температуры и просеивается с целью отделения комьев, гальки и различных посторонних включений через сита с размером ячеек 3-5 мм. Для этого используют барабанные, конические сита и сита с плоским полотном.

Глину подвергают сушке в барабанных печах при температуре 200-250 °С и размельчению в два приема: дроблению на куски размером 15-25 мм в дробилках (щековых, вальцовых, молотковых) и размолу в мельницах (шаровых, молотковых) до частиц размером менее 0,1 мм с последующим просевом на ситах.

В формовочные смеси целесообразно вводить не порошковую глину, а глинистую суспензию. Суспензия (40% глины и 60% воды), приготовленная в бегунах или лопастных смесителях, подается по трубопроводу к местам приготовления формовочных смесей. Этот способ позволяет снизить расход глины на 30%, исключить сушильное, дробильно-размольное, просеивающее оборудование и существенно улучшить условия работы в результате устранения источников выделения пыли и теплоты. Угольный порошок готовят на том же дробильно-размольном оборудовании, что и порошковую глину. Остальные формовочные материалы (связующие, пылевидный кварц, циркон и др.) поступают в литейные цехи в готовом виде и специальной подготовки не требуют. Отработанную смесь, выбитую из опок, перерабатывают и после этого подают в смесеприготовительное отделение. Отработанная смесь, получаемая после выбивки сухих форм, содержит твердые комья, которые разминают между гладкими валками.

Для удаления из смеси металлических включений (брызг металла, шпилек, каркасов стержней) применяют магнитный сепаратор. После магнитной сепарации обрабо-

танная смесь просеивается через цилиндрические или конические ста с размерами ячеек 6–10 мм для отделения немагнитных включений. Смесь, охлажденная до 35 °С, направляется в смесеприготовительное отделение как компонент единых и облицовочных смесей. Отработанные стержневые смеси подвергают специальной переработке, называемой регенерацией, целью которой является получение продукта (регенерата), используемого в качестве заменителя свежего формовочного песка, входящего в состав стержневой смеси. Отработанная стержневая смесь разминается, комья распадаются на отдельные зерна песка и пылевидные частицы, образованные растрескавшимися зернами песка и остатками пленок связующих. После этого смесь классифицируют по размерам зерен в воздушном потоке, постепенно изменяющем скорость своего движения (сухая регенерация) или после смешения с водой в специальных отстойных чанах (мокрая регенерация). Регенерацию применяют после экономического обоснования, так как она требует значительных производственных площадей и связана с большими затратами.

Приготовление формовочных смесей включает следующие операции: дозирование, перемешивание компонентов, увлажнение, вылеживание и разрыхление. Сущность процесса перемешивания состоит в том, чтобы из компонентов получить однородную смесь, все зерна песка которой были бы покрыты тонким, равномерным слоем увлажненной глины или другого связующего. Перемешивание проводят в специальных смесителях, наиболее распространенными из которых являются смешивающие бегуны с вертикальными и горизонтальными катками (рисунок 8.3).

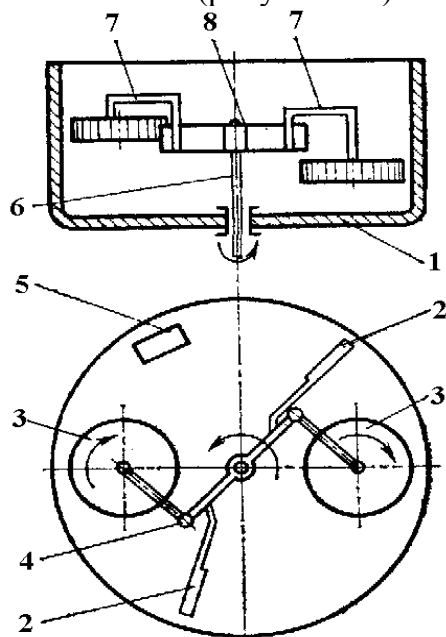


Рисунок 8.3– Смешивающие бегуны с горизонтально расположенными катками

На траверсе 8, укрепленной на вертикальном валу 6, находятся маятники 7, на которых подвешены катки 3. Маятники соединены с траверсой шарниром 4. При вращении вала катки под действием центробежных сил отклоняются к борту чаши 1. Смесь поднимается со дна чаши вращающимися вместе с траверсой плужками 2 и попадает под катки, которые разминают комья и перемешивают смесь. Готовая смесь удаляется из чаши через люк 5. Производительность бегунов 20 м³/ч и более. Продолжительность приготовления одного замеса составляет 1,5–2,0 мин. После переработки в бегунах смеси, содержащие глину, поступают в бункеры-отстойники на вылеживание в течение 2–

6 ч. Это время необходимо для образования водных оболочек вокруг глинистых частиц и устранения неравномерности распределения влаги в смеси.

После бункеров-отстойников смесь разрыхляют в аэраторах или дезинтеграторах, что обеспечивает высокую газопроницаемость и однородность уплотнения смеси в формах (рисунок 8.4).

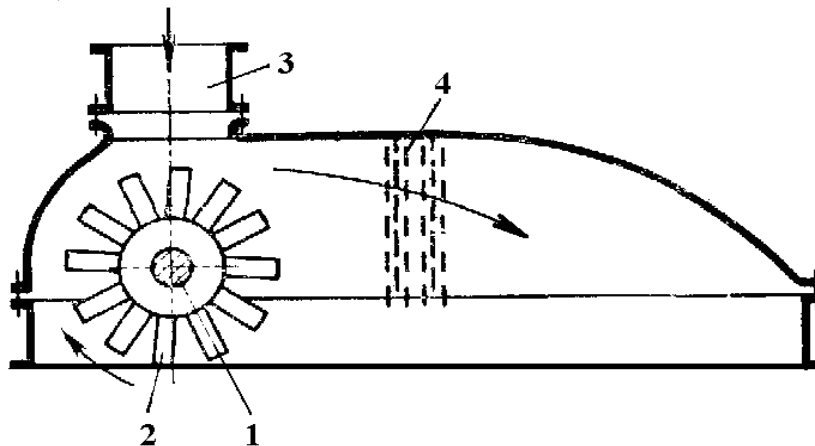


Рисунок 8.4 – Аэратор

В аэраторе вращающиеся на валу 1 лопасти 2 подхватывают непрерывно поступающую через загрузочное отверстие 3 смесь и бросают ее на свободно висящие цепи 4 или прутья, с которых она падает в разрыхленном состоянии. Далее по ленточным конвейерам формовочная смесь подается в бункеры над формовочными машинами.

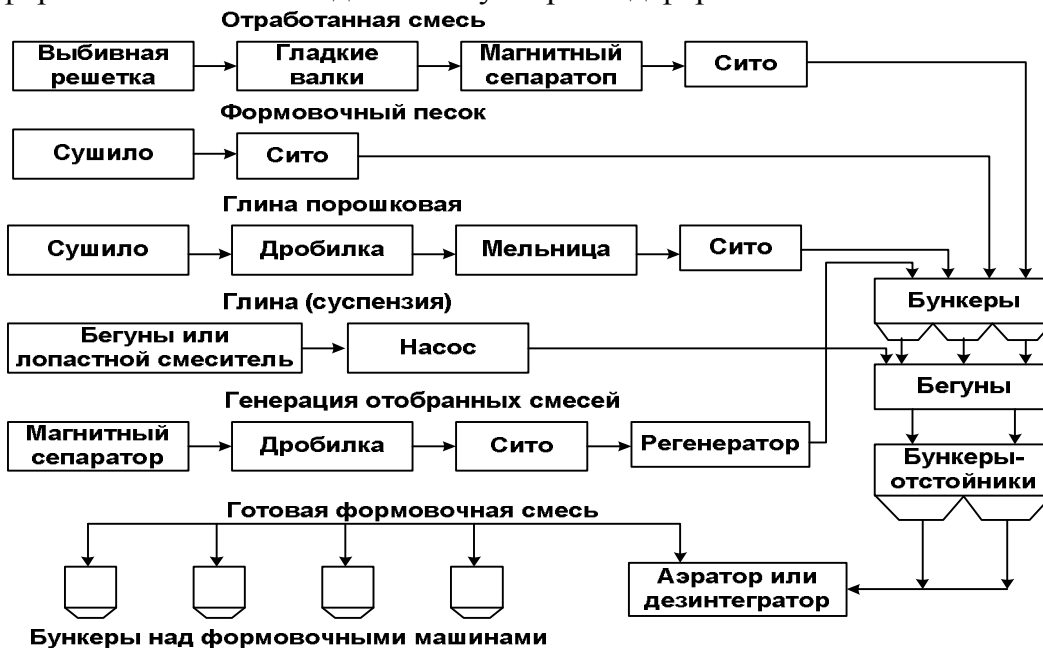


Рисунок 8.5 – Схема приготовления формовочной смеси

8.4 Противопрigarные покрытия

Для улучшения чистоты поверхности отливок на рабочую поверхность форм и стержней наносят специальные противопрigarные покрытия. На поверхности полостей форм, заливаемых в сыром состоянии, наносят припылы. Формы для стальных отливок припыливают пылевидным кварцем, для чугунных отливок – серебристым графитом и тальком.

Сухие формы и стержни покрывают противопригарными покрытиями, представляющими собой суспензию пылевидного огнеупорного материала в воде с добавлением связующего для придания прочности слою покрытия и стабилизирующего вещества, препятствующего расслоению суспензии. Нанесенный слой краски уменьшает шероховатость поверхности формы, закрывает поры между зернами песка, препятствуя прониканию в них жидкого металла и см оксидов. В результате поверхность отливки получается более гладкой, чистой и без пригара.

Формы для отливок из чугуна покрывают углеродсодержащими покрытиями, например, имеющими состав, %: 58,5 графита скрытокристаллического; 3,5 бентонита; 10 сульфитной барды; 28 воды. Плотность этой суспензии 1400 кг/м^3 . В противопригарные покрытия для стальных отливок обычно входят пылевидные кварц, циркон, магnezит, а для отливок из цветных сплавов тальк.

Покрытия наносят на горячие формы и стержни или на холодные с последующей их подсушкой. Применяют и самовысыхающие покрытия на органических растворителях. В ряде случаев можно использовать специальные покрытия, например для предотвращения поверхностного науглероживания отливок из коррозионно-стойких сталей. Известно применение покрытий для модифицирования и поверхностного легирования.

8.5 Модели и модельные плиты

Моделями называют приспособления, предназначенные для получения в литейных формах полостей, конфигурация которых соответствует изготавливаемым отливкам. Модель отличается по конфигурации и размерам от получаемой по ней отливки. В зависимости от конструкции отливки она может быть неразъемной и разъемной, состоящей из двух и более частей. Модель снабжают специальными выступающими частями – знаками. Они образуют в форме углубления, предназначенные для установки и фиксирования стержня. Для облегчения извлечения модели из формы их вертикальные стенки выполняются с формовочными уклонами, величина которых зависит от высоты стенки, материала модели и способа изготовления отливки.

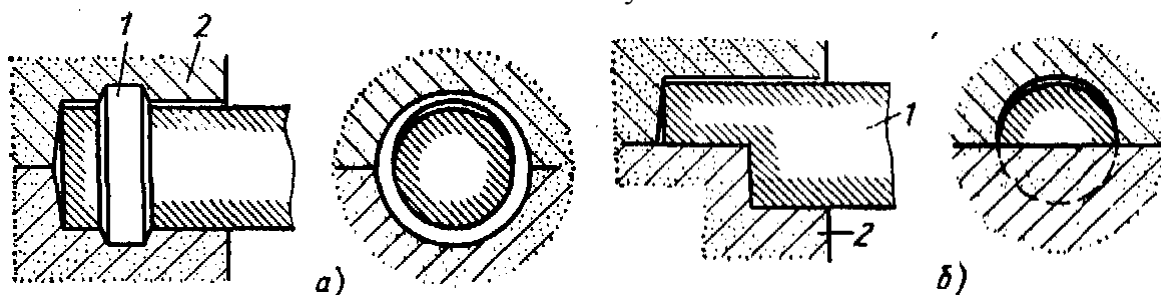
В соответствии с чертежом отливки на модели предусматривают припуски на механическую обработку отливки. Размеры модели должны быть больше размеров отливки на величину литейной усадки. Модель должна быть легкой, но достаточно жесткой, что особенно важно при изготовлении полуформ на прессовых машинах. Для машинной формовки модели монтируют на специальных плитах, которые называют модельными плитами. Каждая модельная плита состоит из плиты и расположенных на ней моделей отливок, литниковой системы, штырей и т. д. Модельные плиты могут быть односторонними и двусторонними, наборными и цельнолитыми. На односторонних плитах модели располагают только на одной верхней стороне, которую называют рабочей. На двусторонних плитах обе стороны являются рабочими и на них располагают половины модели. Последние применяют только при безопочной формовке. Наборная плита состоит из плиты и прикрепленных к ней нескольких частей модели и других деталей. Цельнолитую модельную плиту изготавливают заодно с половиной модели.

8.5.1 Деревянные модели и модельные плиты

Применяют при единичном и мелкосерийном производстве мелких и средних отливок. В зависимости от предъявляемых требований их подразделяют на три класса проч-

ности. Деревянные модели изготовляют трех классов точности в соответствии с тремя классами прочности отливок.

Модельные комплекты первого класса прочности предназначены для длительного использования, второго класса – для периодического использования, третьего класса – для единичного производства неотчетственных, несложных отливок. Для изготовления моделей первого класса прочности используют заготовки, тщательно склеенные из тонких брусков с учетом направления годичных колец, с тем чтобы полностью предупредить коробление модели. Для моделей второго класса прочности заготовки склеивают менее тщательно, используя меньшее число брусков; для моделей третьего класса прочности заготовки склеивают из более толстых кусков.



1 - стержень; 2 – форма; а-кольцевой, предотвращающий перемещение стержня в осевом направлении; б - с одним срезом, предотвращающий вращение стержня и перемещение в осевом направлении

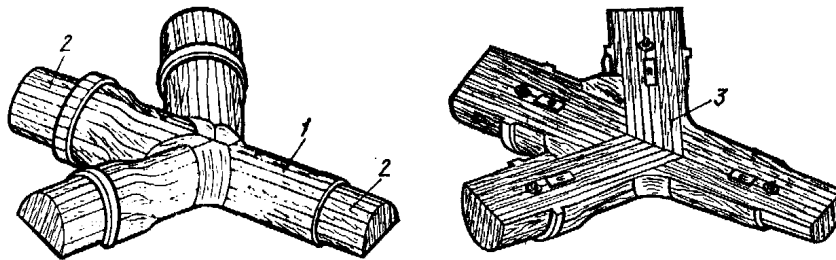
Рисунок 8.6 - Стержневые фиксаторы

Отдельные части модели допускается делать из целого куска. Прочная модель лучше сохраняет свою точность. Поэтому модельные комплекты первого класса прочности изготовляют по I классу точности, второго класса прочности - I и II классам точности, а третьего — по III классу точности. Дерево является распространенным и недорогим материалом. Оно имеет малую плотность, легко обрабатывается, после чего получается гладкая, чистая поверхность. Недостатки дерева — гигроскопичность, возможность коробления, неоднородность строения и для некоторых пород недостаточная прочность и износостойкость. Для устранения коробления модели покрывают лаками и красками, формовочные уклоны деревянных моделей составляют 1-3°; чем выше модель, тем меньше формовочные уклоны. Уклоны на внутренних поверхностях модели делают больше, чем на наружных. Места соединения литейной формы со стержнем, называемые знаковыми частями, должны обеспечивать вполне определенное и устойчивое положение стержней в форме, поэтому знаковые части часто снабжают фиксаторами. Размеры и элементы стержневых знаков регламентируются ГОСТ 3606-80 и выбираются в зависимости от конструкции отливки и технологии изготовления формы. Между знаками формы и знаками стержней предусматривают зазоры, величина которых также выбирается по ГОСТ 3606-80 и зависит от размеров знаков и класса точности отливки.

Наиболее часто в модельном производстве используют сосну, ольху, бук, липу, ясень. Из сосны изготовляют средние и крупные модели. Сосна является самым дешевым материалом, легко обрабатывается, не склонна к загниванию. Из ольхи делают средние и мелкие модели, непрерывно находящиеся в работе. Обработанная поверхность получается гладкой. Бук и ясень применяют для изготовления особо прочных моделей. Липа относится к породам деревьев, древесина которых не обладает большой твердостью. Из нее изготовляют модели, предназначенные для получения небольшого числа отливок.

Процесс изготовления деревянной модели пли стержневого ящика складывается из следующих операций: выполнение в натуральную величину чертежа модели со знаковыми частями и т. п.; изготовление заготовок, их обработка (фрезерование, шлифование и пр.); сборка частей модели (склеиванием с помощью шпунтовых или шиповых соединений и пр.); контроль, приемка и окраска модели.

Модели красят масляной краской, затем покрывают щелочным лаком с целью получения гладкой рабочей поверхности и предохранения ее от воздействия влаги атмосферы и формовочной смеси. Окраску и маркировку проводят в соответствии с ГОСТ 2413-67. Для чугунного литья используют модели красного цвета, для стального – серого, для цветного – желтого. Стержневые знаки и другие не соприкасающиеся с металлом части окрашивают в черный цвет.



1 - верхняя половина модели; 2 - знаковые части; 3 - нижняя половина модели

Рисунок 8.7 – Деревянная модель

Металлические модели и плиты используются в основном в условиях крупносерийного и массового производства отливок. По сравнению с деревянными металлические модели имеют следующие преимущества: долговечность, большую точность и более гладкую рабочую поверхность. Их используют при машинной формовке, которая предъявляет определенные требования к конструкции и качеству модельной оснастки. Конструкция моделей, предназначенных для машинной формовки, должна быть максимально упрощена, даже за счет увеличения числа стержней.

Это требует повышения точности моделей, центрирования отдельных элементов и узлов оснастки, а также надежности крепления их на модельных плитах. Материалами для металлических моделей и плит служат алюминиевые сплавы, чугун, сталь, бронза и латунь. Алюминиевые модели и плиты имеют малую массу, легко поддаются механической обработке и удобны в работе. Они не окисляются, после обработки приобретают гладкую поверхность. Недостатком алюминиевых моделей является их низкая прочность и малая износостойкость, что особенно сказывается в массовом производстве. Для не очень ответственных моделей используют сплавы АЛ24, АЛ26, для сложных и ответственных — АЛ22, АЛ28.

Чугунные модели прочны, дешевы, хорошо обрабатываются и после обработки имеют гладкую рабочую поверхность. Износостойкость чугуна значительно выше, чем алюминиевых сплавов. Недостатки чугунных моделей: большая масса и окисляемость. Для изготовления оснастки используют чугуны марок СЧ15, СЧ20.

Стальные модели и плиты отличаются высокой прочностью и износостойкостью. Для их изготовления используются стали марок 15Л—45Л, а также стальной прокат различного сортамента.

Бронзовые и латунные модели после обработки имеют очень гладкую поверхность, не окисляются; получаемый с их помощью отпечаток является наилучшим по качеству. Они более коррозионно-стойки, чем чугунные и стальные модели, по значительно тяже-

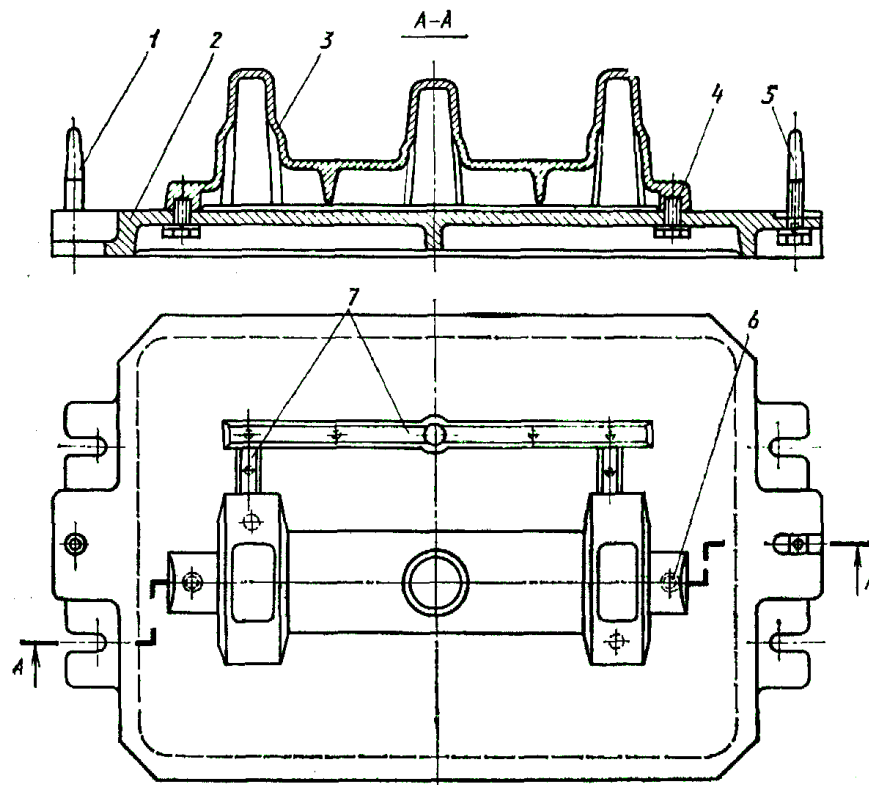
лее их. Их применяют сравнительно редко для изготовления небольших сложных отливок высокой точности и с повышенным качеством поверхности.

Легкими и жесткими являются облегченные модели — пустотелые, снабженные для жесткости ребрами, расположенными по внутренней полости.

Формовочные уклоны на металлических моделях делают меньше 0,5-10 вследствие того, что рабочие поверхности модели получаются более гладкими. Кроме того, металлические модели, как правило, применяют для машинной формовки, когда извлечение их из полуформ производится специальным механизмом.

Конструкция модельной плиты зависит главным образом от типа машины, на которой будет изготавливаться полуформа, конструкции отливки, получаемой по данному модельному комплекту, и вида формы. Применяют модельные плиты трех разновидностей: для опочной формовки, для безопочной формовки и для изготовления оболочковых полуформ. Модельные плиты снабжают специальными лапками или приливами для крепления к столу машины. Для фиксирования опоки на плите они имеют минимум два штыря: один круглый — центрирующий, второй квадратный — направляющий. Центрирующий штырь предохраняет опоку от смещений в горизонтальном направлении, а направляющий — от смещений относительно поперечной оси плиты.

Процесс изготовления металлических моделей складывается из следующих операций: вычерчивание чертежа металлической модели; изготовление деревянной модели, предназначенной для получения металлической заготовки модели; литье металлической заготовки модели; ее механическая обработка; монтаж металлической модели на модельной плите; контроль и приемка металлической модельной оснастки.



1-штырь центрирующий; 2-модельная плита; 3-верхняя половина модели; 4-крепежный болт; 5-штырь направляющий; 6-контрольный штифт; 7-модели литниковой системы

Рисунок 8.8 – Расположение моделей отливки и литниковой системы на модельной плите

Размеры деревянной модели (промоделки) для получения отливок металлических моделей увеличены в расчете на двойную усадку: сплава модели и сплава отливки. Промодель выполняется также с учетом припусков на обработку металлической модели. Литую металлическую модель подвергают тщательной механической обработке по рабочей поверхности, а также по поверхностям соприкосновения с модельной плитой. Затем обработанную модель монтируют на модельной плите.

Крепление половин моделей к плитам осуществляется винтами или болтами с нижней стороны плиты. В том случае, если половины моделей низкие, их крепят винтами сверху. Число и размеры винтов и болтов определяют в зависимости от формы и средних размеров половин модели.

8.6 Стержневые ящики

Конструкция стержневого ящика зависит от формы и размеров стержня и способа его изготовления. По конструкции стержневые ящики подразделяют на неразъемные (вытряхные) и разъемные, которые для удаления из них стержня разбираются на две или больше частей.

Каждому стержневому ящику этих типов соответствует определенный метод заполнения смесью рабочей полости и отделения от стержня, а также определенная поверхность сушки стержня, если он сушится после удаления из ящика.

Выбор направления заполнения ящика смесью зависит прежде всего от метода изготовления стержня, а также от установки каркасов и холодильников. Поверхность, на которой лежит стержень во время сушки, должна обеспечивать его устойчивое положение при транспортировании и сушке. Желательно, чтобы эта поверхность была плоской, что облегчало бы изготовление стержня и упрощало конструкцию ящика. Размер рабочей полости стержневого ящика увеличивают на величину усадки отливки. Для свободного удаления стержня из ящика на соответствующих его поверхностях предусматривают формовочные уклоны. Для образования знаков стержня в ящике выполняют специальные углубления или выступы.

Деревянные вытряхные и разъемные ящики используют преимущественно в единичном и мелкосерийном производстве. Изготавливают их из тех же пород древесины, что и модели. Разъемные стержневые ящики выполняются с горизонтальным, вертикальным или иным разъемом. Части разъемного ящика скрепляют с помощью клиньев, крючков, стяжек.

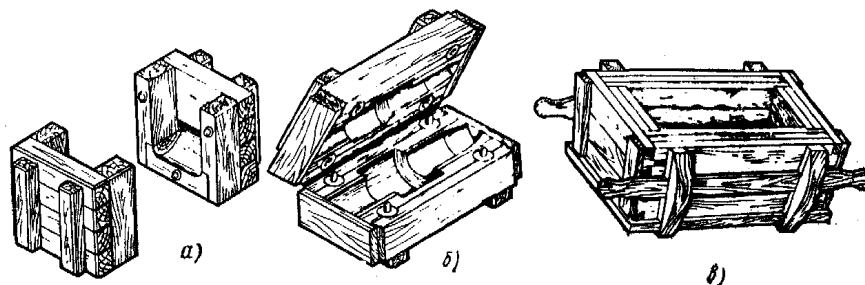


Рисунок 8.9 – Деревянные стержневые ящики

Вытряхной ящик представляет собой жесткую коробку, в которую вставляют вкладыши, образующие рабочую полость стержня. После изготовления стержня ящик поворачивают на 180° и устанавливают на сушильной плите. Ящик поднимают, со стержня снимают вкладыши и вставляют их в ящик. Изготавливают деревянные ящики так же, как и деревянные модели.

Металлические стержневые ящики применяют в массовом и крупносерийном производстве. Их выполняют преимущественно из алюминиевых сплавов. Металлические стержневые ящики делают вытряхными, но чаще разъемными с вертикальным и горизонтальным разъемами. Части стержневого ящика соединяют с помощью штырей и скрепляют скобами или откидными барашками или крепят в зажимах машины.

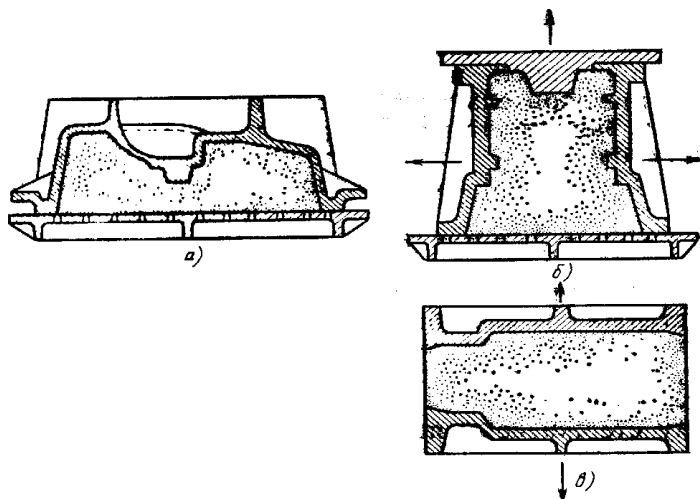


Рисунок 8.10 – Металлические стержневые ящики

Металлические стержневые ящики выполняют тонкостенными; толщину стенки выбирают в зависимости от материала и размеров ящика. С целью увеличения жесткости стержневой ящик с внешней стороны снабжается ребрами жесткости, а в плоскостях набивки и разъема для увеличения конфигурационной прочности — бортиками, которые для предохранения от быстрого износа бронируют стальными пластинками.

Очень большое распространение получили пескодувный и пескострельный способы изготовления стержней. Для пескодувных машин применяют неразъемные и разъемные стержневые ящики. При заполнении смесью они испытывают избыточное давление воздуха, абразивное действие песчано-воздушной струи, а также усилие поджима ящика к надувному соплу машины, поэтому должны обладать повышенной жесткостью, прочностью, быть герметичными по плоскости разъема и наддува.

Для выхода воздуха из ящика в поверхности разъема выполняют специальные щели глубиной 0,15—0,2 мм. Стержневая смесь через них не проходит. У сложных по конфигурации стержневых ящиков, имеющих разветвления, углубления и карманы, вывод воздуха обеспечивается вентиляционными пробками (вентами).

Все большее применение находят способы изготовления стержней в нагреваемой оснастке и из холоднотвердеющих смесей (ХТС). Нагреваемая оснастка состоит из собственно стержневого ящика, системы нагрева, системы толкателей для удаления стержня из ящика, системы спаривания и вентиляционной системы. Она должна выдерживать значительные внутренние термические напряжения, возникающие при нагреве до 300°C и последующем охлаждении, и сохранять при этом высокую механическую прочность. Конструкция стержневого ящика должна обеспечить минимальное его коробление при

нагреве, поэтому стенки ящика выполняют толщиной не менее 20 мм и снабжают ребрами жесткости. Изготавливают ящики из специальных легированных чугунов и сталей.

При изготовлении стержней пескодувным способом из ХТС преимущественно используют металлические ящики. Так как стержни извлекаются из ящиков в отвержденном состоянии, последние должны изготавливаться с увеличенными в полтора-два раза формовочными уклонами. Предусматривается механизированное извлечение стержней системой толкателей.

Металлические стержневые ящики делают так же, как и металлические модели, но при этом учитывают не двойную усадку, а только усадку материала стержневого ящика.

Стержневые ящики для автоматических стержневых линий конструируют таким образом, чтобы их внешние размеры соответствовали допустимым для данной линии наибольшим размерам. Мелкие стержни производят в многогнездных ящиках. Унификация стержневых ящиков приводит к унификации сушильных плит и автоматизации всех вспомогательных операций по изготовлению стержней.

Стержневые ящики из пластических масс бывают двух типов; пластмассовые в корпусе из алюминиевых сплавов, предназначенные для массового и крупносерийного производства и обеспечивающие изготовление до 30 000 стержней, и цельнопластмассовые, предназначенные для мелкосерийного и серийного производства, обеспечивающие изготовление до 1000 стержней.

8.7 Опоки

Опоки изготавливают из серого чугуна, стали, алюминиевых и магниевых сплавов. Чугунные опоки изготавливают и применяют преимущественно в чугунолитейных цехах. Для производства стальных опок, более прочных и долговечных, чем чугунные, применяют углеродистую сталь. Опоки из алюминиевых сплавов значительно более легкие, чем чугунные и стальные, очень удобны в работе, но менее жестки. Опоки из магниевых сплавов являются наиболее легкими и достаточно прочными, но дорогими. По конфигурации опоки бывают: прямоугольными, круглыми и реже – фигурными.

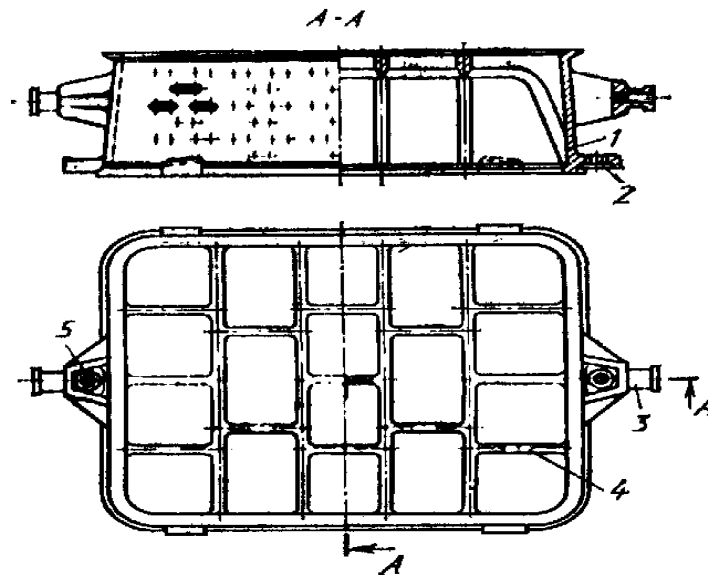
Опоки могут быть, цельнолитыми и сварными. В зависимости от размеров и массы их подразделяют на ручные и крановые.

Крановые опоки обслуживаются подъемными механизмами. Для транспортирования они снабжены цапфами.

Для облегчения выхода газов и паров воды в стенках опоки выполняют специальные отверстия, называемые вентиляционными. Для удержания уплотненной смеси в опоке и увеличения жесткости конструкции средние и крупные опоки снабжают внутренними ребрами. Для упрощения обработки опок верхний уровень ребер жесткости часто выполняется ниже бортиков опок.

Соединяются опоки с помощью втулок и центрирующих штырей. Опоки имеют ушки, предназначенные для установки в них втулок — центрирующих (круглых) и направляющих (эллипсных).

Во избежание поднятия верхней полуформы гидростатическим давлением жидкого металла ее нагружают или скрепляют верхнюю и нижнюю полуформы. В массовом производстве наиболее распространено скрепление опок скобами или нагружение грузом, в единичном или мелкосерийном производстве — штырями с клиньями или болтами с гайками.



1-стенка; 2-направляющая втулка; 3-цапфа; 4-ребро жесткости; 5-центрирующая втулка
Рисунок 8.11 – Прямоугольная крановая опока

8.8 Изготовление форм и стержней

Изготовление разовых литейных форм называют формовкой. Это трудоемкий и ответственный этап всего технологического цикла изготовления отливок, который в значительной степени определяет их качество. При формовке выполняют следующие технологические операции:

1 уплотнение смеси, позволяющее получить точный отпечаток модели в форме и придать ей необходимую прочность в сочетании с податливостью, газопроницаемостью и другими свойствами;

2 устройство в форме вентиляционных каналов, облегчающих выход из полости формы образующихся при заливке газов;

3 извлечение модели из формы;

4 отделку и сборку формы, включая установку стержней.

Разовые литейные формы позволяют получать практически любые по конфигурации, сложности и массе отливки. В зависимости от размеров, массы и толщины стенки отливки, а также марки литейного сплава его заливают в сырые, сухие или химические твердеющие формы. В сырых формах изготавливают мелкие и средние отливки, в других случаях перед сборкой полуформы высушивают на всю глубину или на 20—30 мм от поверхности, обеспечивают химическое твердение смеси в опоке. Литейные формы делают вручную, на формовочных машинах, полуавтоматических и автоматических линиях.

8.8.1 Ручная формовка

Несмотря на механизацию и автоматизацию производственных процессов, изготовление форм вручную часто наиболее целесообразно в условиях единичного, а иногда и мелкосерийного производства. Доля отливок, получаемых в формах, изготовленных таким образом, в настоящее время составляет 20 %. Существует множество технологических вариантов формовки, наиболее распространенным из которых является получение форм в парных опоках по разъемной модели. Разъемную модель применяют, как правило, в тех случаях, когда модель не имеет плоской поверхности (рисунок 8.12).

На модельную плиту 4 устанавливают нижнюю половину 8 модели и нижнюю опоку 2 рабочей плоскостью вниз. На модель наносят слой облицовочной смеси толщиной 40—100 мм, который слегка уплотняют. Затем опоку заполняют наполнительной смесью и уплотняют ручной или пневматической трамбовкой.

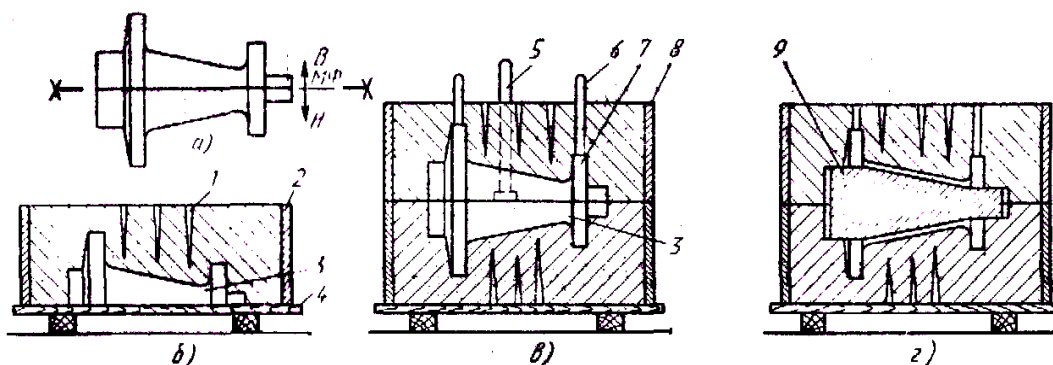
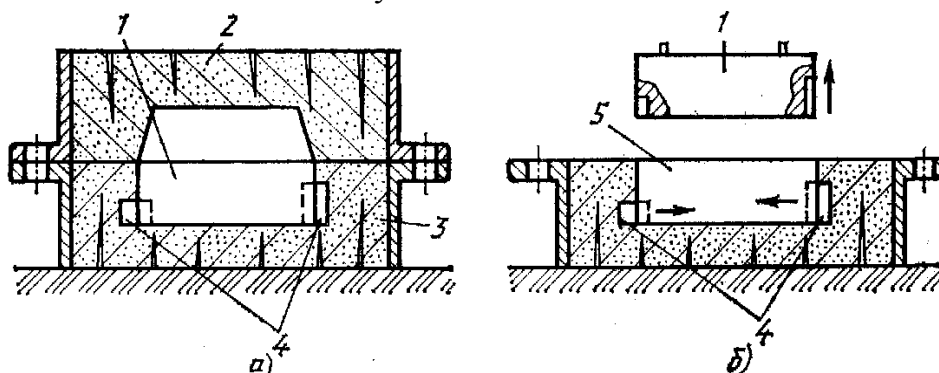


Рисунок 8.12— Изготовление формы в двух опоках по разъемной модели

Излишек формовочной смеси срезают линейкой вровень с кромкой опоки, делают наколы 1, улучшающие газопроницаемость формы. Опоку с заформованной в ней половиной модели поворачивают на 180° и вновь устанавливают на модельную плиту. На нижней половине 3 модели фиксируют ее верхнюю половину 7, устанавливают модели стояка 5 и других элементов литниковой системы, выпора 6. Плоскость разъема формы посыпают разделительным песком и на нижнюю опоку устанавливают верхнюю 8. Модель и элементы литниковой системы покрывают слоем облицовочной смеси толщиной 40—100 мм, слегка обжимают и опоку заполняют наполнительной смесью.



а — изготовленная форма; б — извлечение модели и отъемных частей;
1 — модель; 2 — верхняя полуформа; 3 — нижняя полуформа;
4 — отъемные части модели; 5 — полость нижней полуформы

Рисунок 8.13 – Формовка по модели с отъемными частями

После уплотнения смеси трамбовкой срезают излишки смеси, делают вентиляционные наколы и извлекают модели стояка и выпора. Верхнюю полуформу снимают, поворачивают на 180° и извлекают с помощью специального подъемника половины моделей отливки и литниковой системы. Затем в нижнюю полуформу устанавливают стержень 9, который оформляет внутреннюю полость отливки, и на нижнюю полуформу с помощью штырей устанавливают верхнюю полуформу. После скрепления опок или нагружения форма считается подготовленной к заливке. Иногда при изготовлении сложных отливок одна плоскость разъема не позволяет извлечь модель из верхней и нижней полуформ. В этих случаях применяют формовку в трех и большем числе опок, т. е. фор-

ма имеет две и больше поверхностей разъема. Иногда вместо дополнительного разъема на модели делают отъемные части или устанавливают наружные стержни. Схема формовки по модели с отъемными частями.

Формы для несложных отливок могут быть изготовлены по неразъемной модели, допускающей ее извлечение из формы без разрушения последней. Применение неразъемных моделей сложных конфигураций возможно также при использовании специальных приемов (подрезки, фальшивой опоки и т. д.). В этих случаях последовательность операций по изготовлению собственно формы аналогична описанной выше.

Формы для крупных уникальных отливок массой в несколько десятков, а иногда и сотен тонн, как правило, изготавливают в специальных ямах (кессонах), дно которых находится ниже уровня пола цеха. Стенки и дно кессонов для предупреждения попадания в них грунтовой воды облицовывают бетоном или железобетоном. Формовку в почве применяют для изготовления отливок, не требующих высокой точности. При этом формовочную смесь уплотняют вокруг модели с помощью пневматических трамбовок или пескоструйкой, а при изготовлении небольших отливок модель вдавливают в заранее подготовленный слой формовочной смеси.

8.8.2 Машинная формовка

Основную часть форм получают машинной формовкой. Машины позволяют механизировать две основные операции формовки (уплотнение смеси, удаление модели из формы) и некоторые вспомогательные (устройство литниковых каналов, поворот опок и т. д.). При механизации процесса формовки улучшается качество уплотнения, возрастает точность размеров отливки, резко повышается производительность труда, облегчается труд рабочего и улучшаются санитарно-гигиенические условия в цехе, уменьшается брак.

Процесс изготовления форм в парных опоках на машинах идет следующим образом. Формовочная смесь каким-либо транспортным средством (системой ленточных конвейеров или электротельфером с бадьей) подается в бункеры, установленные над машинами. Пустые верхняя и нижняя опоки с места выбивки форм подаются к машинам по рольгангам. Как правило, нижнюю полуформу изготавливают на одной машине, а верхнюю — на другой. На модель с модельной плитой, закрепленную на столе машины, устанавливают опоку, далее с помощью дозатора опоку заполняют смесью из бункера. Затем смесь уплотняют. Готовую полуформу снимают с машины и подают на приемное устройство, чаще всего рольганг, где полуформу отделяют (устраняют дефекты, делают вентиляционные каналы, наносят покрытие, если это необходимо, и т. д.) и затем транспортируют на сборку. Если форма должна быть высушена, то полуформы направляют в сушило и только после остывания и отделки — на сборку.

В массовом производстве мелких отливок иногда применяют безопочную формовку. Этот способ правильнее было бы называть способом безопочной заливки, так как формовку осуществляют в специальных опоках, которые после изготовления формы снимают. Способ позволяет значительно сократить парк опок и облегчить выбивку отливок. Съёмные опоки целесообразно применять для форм, изготавливаемых прессованием под высоким давлением.

Формовочные машины классифицируют по методам уплотнения смеси, удаления модели из формы и приведения в действие.

По методам уплотнения формовочной смеси различают следующие типы формовочных машин:

- 1 прессы с давлением прессования до $5 \cdot 10^5$ Па и более 10^6 Па;
- 2 встряхивающие;
- 3 пескометы;
- 4 пескодующие;
- 5 пескострельные;
- 6 импульсные;
- 7 вакуумные;
- 8 специальные.

8.8.3 Прессы

Прессы могут быть с верхним и нижним прессованием (рисунок 8.14). При верхнем прессовании модельную плиту 2 с моделью 3 укрепляют на столе 1. Устанавливают опоку 4 высотой H с наполнительной рамкой 5 высотой h затем в них насыпают формовочную смесь. Стол с опокой поднимается, и прессовая колодка 6, входя внутрь наполнительной рамки 5, уплотняет смесь. Прессование заканчивается в момент, когда вся формовочная смесь, находящаяся в наполнительной рамке, перейдет в опоку. Высота прессовой колодки и высота наполнительной рамки одинаковые. Степень уплотнения ρ смеси при верхнем прессовании неодинакова по высоте опоки. По мере удаления от прессовой колодки степень уплотнения уменьшается до определенного предела и затем несколько возрастает из-за сопротивления, которое оказывает жесткая плоскость модельной плиты передвижению смеси в процессе уплотнения. С увеличением высоты опоки увеличивается неравномерность уплотнения смеси. По этой причине высота опок не может превышать 250 мм.

В машинах с нижним прессованием роль наполнительной рамки выполняет углубление h в неподвижном столе 7 (рисунок 8.14б).

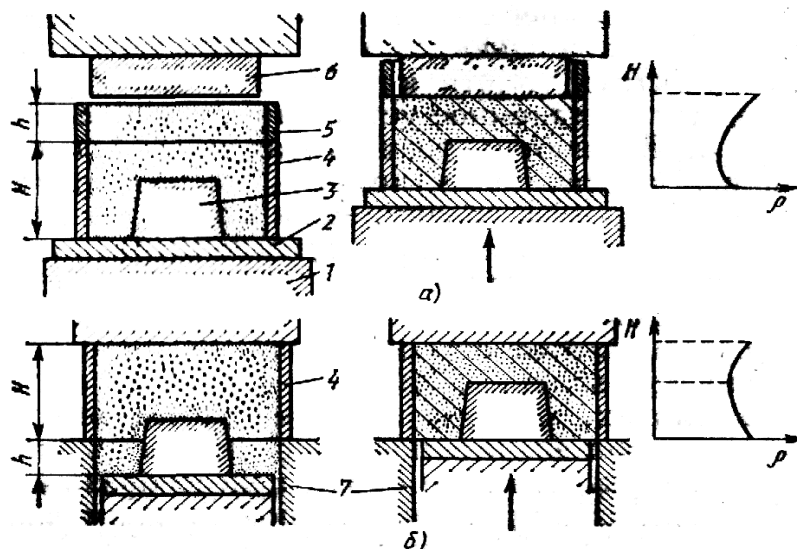


Рисунок 8.14 - Схемы верхнего (а) и нижнего (б) прессования и изменение плотности смеси по высоте опок

По сравнению с верхним прессованием максимальная степень уплотнения смеси достигается у модели. Этот вариант технологически более благоприятен, однако такие машины обладают худшими эксплуатационными качествами.

В некоторых машинах прессование осуществляется одновременно с вибрацией. Песчинки смеси совершают колебания с малой амплитудой и большой частотой, трение между ними и о боковые стенки опоки уменьшается. В результате прессование происходит эффективнее, смесь уплотняется равномернее. В этом случае можно применять более высокие опоки.

Прессовые машины, работающие под высоким давлением ($2 \cdot 10^6$ Па), позволяют уплотнять смеси в высоких опоках, которые ранее использовали на встряхивающих машинах, работающих с большим шумом. Прочность формовочной смеси при этом способе увеличивается за счет сцепления зерен песка, а не за счет сил связи между водными оболочками вокруг зерен песка. Поэтому на этих машинах можно использовать смеси с пониженной влажностью (1,5—3 %), что уменьшает брак отливок по газовым раковинам. Высокое давление прессования позволяет получать более точный отпечаток и изготавливать отливки с меньшими припусками на механическую обработку. С повышением плотности смеси увеличивается ее теплопроводность, ускоряется охлаждение отливки. Связь между плотностью смеси в форме и давлением прессования выражается формулой $\rho = \rho_1 + n \lg p$, где ρ_1 — средняя плотность смеси; p — давление прессования, $p = 10^5$ Па; n — изменение плотности смеси при изменении давления на 10^5 Па.

8.8.4 Встряхивающие машины

На столе 3 машины укреплена плита 2 с моделью, на которую устанавливают опоку 1 и заполняют ее формовочной смесью (рисунок 8.15). Стол поднимается под давлением воздуха на 30—80 мм. После того как поршень 4 дойдет до отверстия 5, сжатый воздух выйдет, и стол, падая, ударится о преграду. Уплотнение происходит под действием силы тяжести смеси. Число ударов стола о преграду — борта пневматического цилиндра — составляет 30-50 в минуту.

При встряхивании наиболее сильно уплотняются нижние слои, непосредственно прилегающие к модельной плите. По мере удаления от плиты масса вышележащего слоя смеси уменьшается, а следовательно, уменьшается степень уплотнения. Верхний слой смеси остается практически неуплотненным. Характер плотности смеси по высоте опоки при встряхивании описан кривой 1. Верхние слои смеси в опоках дополнительно уплотняют подпрессовкой. С этой целью на машинах устанавливают специальные устройства. Характер распределения плотности смеси по высоте опоки после встряхивания и подпрессовки описывается кривой 2.

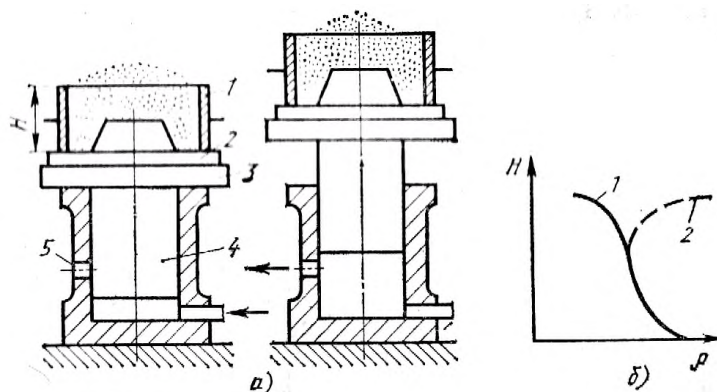


Рисунок 8.15 – Схема работы встряхивающей формовочной машины и распределение степени уплотнения смеси по высоте опоки

8.8.5 Пескометы

Основной рабочей частью пескомета является головка (рисунок 8.16). Внутри ее кожуха 1 с большой скоростью вращается ротор с одной или двумя лопатками 3. Скорость вращения ротора 1500 об/мин. Через отверстие 4 и кожухе 1 лопатки выбрасывают смесь 5, которая в головку подается транспортером 2. При падении за счет силы тяжести смесь уплотняется.

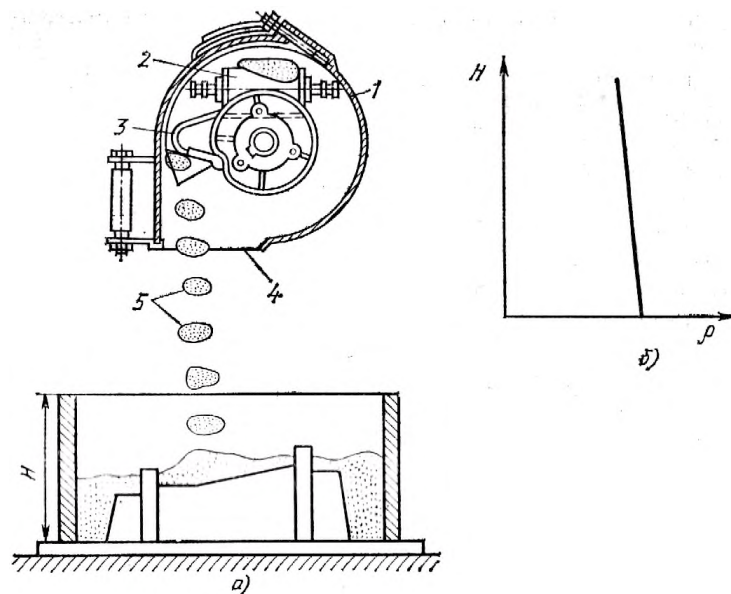
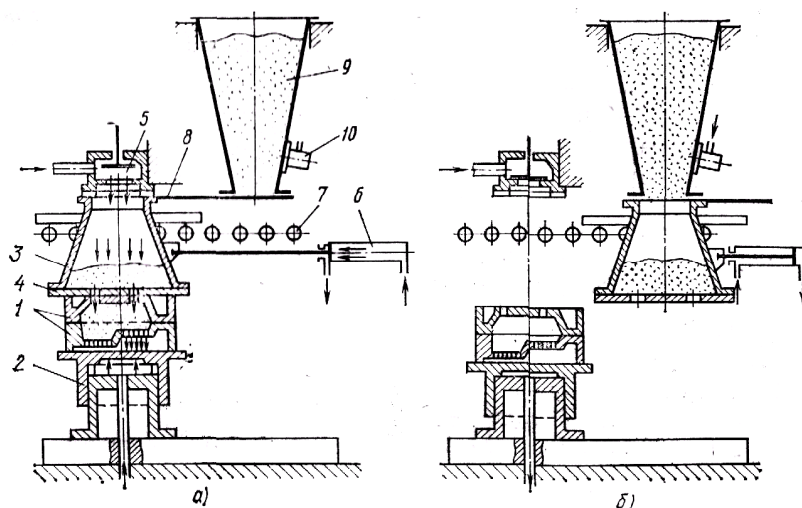


Рисунок 8.16 – Схема уплотнения смеси пескометом и распределение степени уплотнения смеси по высоте опоки

Головку монтируют на подвижной консоли пескомета, что дает возможность перемещать ее в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Формы или стержни с помощью пескометов изготавливают двумя способами: перемещением пескомета относительно неподвижных опок или стержневых ящиков и перемещением опок или стержневых ящиков с помощью транспортных устройств относительно неподвижно установленного пескомета. Степень уплотнения смеси по высоте опоки практически одинаковая. Производительность пескометов составляет обычно не менее 10—12 м³/ч формовочной смеси, поэтому их целесообразно применять для изготовления средних и крупных форм и стержней. Пескометы только заполняют опоки смесью и уплотняют ее, другие операции формовки они не выполняют.

8.8.6 Пескодувные машины

Формовочную (стержневую) смесь вдувают в опоку (стержневой ящик) под большим давлением (рисунок 8.16). Машина имеет пескодувный резервуар 3, периодически заполняемый смесью из бункера 9. Вибратор 10 предусмотрен для предупреждения застывания смеси в бункере. Заполненный резервуар перемещается цилиндром 6 по рольгангу 7 на рабочую позицию. При этом бункер 9 перекрывается шиберным затвором 8. Стержневой ящик 1 прижимается столом 2 к вдувной плите 4. Сжатый воздух через распределитель 5 поступает в пескодувный резервуар и через вдувные отверстия выносит песчано-воздушную массу в полость опоки и уплотняет ее.



а - заполнение пескодувного резервуара смесью; б - наддув смеси в стержневой ящик

Рисунок 8.17 – Схема работы пескодувной машины

В опоке имеются отверстия (венты), закрытые сеткой и предназначенные для выхода воздуха из полости опоки. В основном смесь уплотняется за счет перепада давления и верхней части ящика, у вдувных отверстий и вент (внизу, сбоку ящика). Если изготавливаемый стержень имеет сложную конфигурацию, то венты следует располагать в труднодоступных для смеси местах ящика.

8.8.7 Пескострельные машины

Пескострельные машины являются разновидностью пескодувных (рисунок 8.18). Смесь из бункера 1 через шибер 2 подается в рабочий резервуар 3 и уплотняется при мгновенном перемещении из пескострельного резервуара через вдувное отверстие и стержневой ящик (опоку) под давлением воздуха. Сжатый воздух из резервуара 8 через быстродействующий клапан 9 большого сечения поступает в рабочий резервуар 3. Давление в резервуаре мгновенно повышается и ударно действует на смесь, выбрасывая ее через вдувное отверстие 6 в полость стержневого ящика 5. Сопло (вдувное отверстие) обязательно должно быть конической формы, чтобы воздух не прорвался в стержневой ящик и не ухудшил качество уплотнения смеси. Отверстия 7 во вдувной плите 4 необходимы для удаления воздуха, вытесняемого смесью из стержневого ящика. В стержневом ящике венты, как правило, отсутствуют, что в значительной степени удешевляет конструкцию ящика.

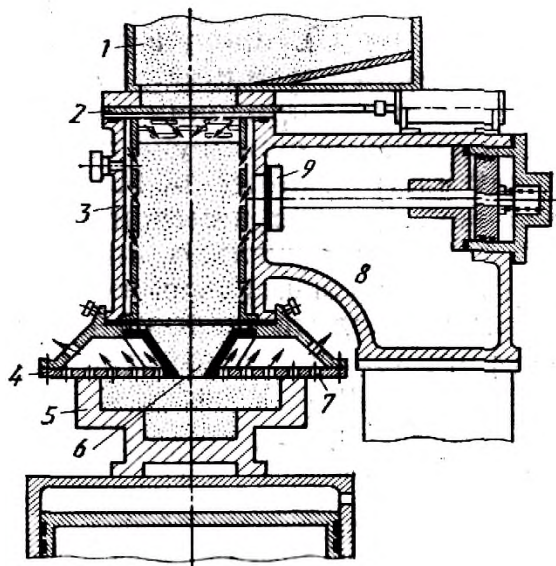


Рисунок 8.18 – Схема работы пескострельной машины

При этом не происходит образования воздушно-песчаной смеси. Отсутствие песчано-воздушной массы резко снижает абразивное действие потока смеси на оснастку, что позволяет применять деревянные ящики. На пескострельных машинах в нашей стране и за рубежом изготавливают преимущественно стержни.

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Какие исходные материалы применяют для приготовления формовочных и стержневых смесей?
- 2 Опишите технологический процесс получения отливки в разовой песчаной форме.
- 3 Как классифицируют связующие материалы для формовочных и стержневых смесей?
- 4 Основное назначение модельного комплекта?
- 5 Расскажите технологию приготовления формовочных смесей.
- 6 Расскажите технологию изготовления форм и стержней.
- 7 Как подразделяются формовочные машины по методам уплотнения формовочной смеси?
- 8 Как подразделяются формовочные машины по методам уплотнения стержневой смеси?

Глава 9 Специальные виды литья

9.1 Изготовление отливок литьем по выплавляемым моделям

Сущность метода и область применения. Сущность метода состоит в том, что по неразъемной легкоплавкой модели изготавливают неразъемную разовую форму. Модели из этой формы выплавляют, а образовавшуюся полость заливают жидким металлом. При этом способе получаемые отливки настолько точны, что объем механической обработки, уменьшается на 80-100% и в 1,5-2 раза сокращается расход жидкого металла. Высокая точность и чистота поверхности отливки обеспечиваются: применением неразъемных моделей; отсутствием формовочных уклонов; изготовлением стержней в процессе формовки, а не отдельно в стержневых разъемных ящиках; использованием маршалита (кварцевая мука) в качестве наполнителя в формовочной смеси, что обеспечивает получение гладкой поверхности отливки.

Литье по выплавляемым моделям применяют при производстве отливок очень сложной конфигурации из любых литейных сплавов, в том числе из высоколегированных сталей, имеющих высокую температуру плавления и трудно поддающихся механической обработке и ковке. Этим способом можно получать отливки массой 0,02-100 кг, с толщиной стенок до 0,5 мм и отверстиями диаметром до 2 мм.

Технология получения отливок. Литье по выплавляемым моделям включает следующие этапы:

- а) изготовление разъемных пресс-форм;
- б) получение неразъемных легкоплавких моделей в пресс-формах;
- в) изготовление неразъемной разовой формы по легкоплавким моделям;
- г) выплавление моделей из формы;
- д) обжиг формы;
- е) заливка формы металлом и выбивка готовых отливок.

Разъемные пресс-формы изготавливают из стали или алюминиевых сплавов. Полость пресс-формы точно повторяет конфигурацию и размеры будущей детали с учетом усадки модельного состава.

Неразъемные легкоплавкие модели получают запрессовкой в пресс-форму модельного состава, нагретого до тестообразного состояния. Для его изготовления широко используют легкоплавкие материалы: парафин, стеарин, воск, церезин, канифоль и др. Легкоплавкая модель в отличие от обычной является точной копией изготавливаемой детали: она неразъемная, имеет все внутренние полости, отверстия, резьбу и не имеет стержневых знаков.

На рисунке 9.1 приведен чертеж отливаемой детали 1 и неразъемной модели, отличающейся от нее наличием питателя 2. Модели питателями «припаивают» к общему легкоплавкому стояку 3, и в результате получают блок моделей. Чтобы изготовить литейную форму, готовый блок моделей окунают в огнеупорную смесь, представляющую собой суспензию маршалита (60-70%) в гидролизованном этилсиликате (30-40%). После окунания на моделях, питателях и стояке остается тонкая огнеупорная пленка смеси 4. Эта же смесь заполняет все полости и отверстия в моделях, образуя стержни. Для упрочнения огнеупорной пленки блок моделей посыпают мелким сухим кварцевым песком 5.

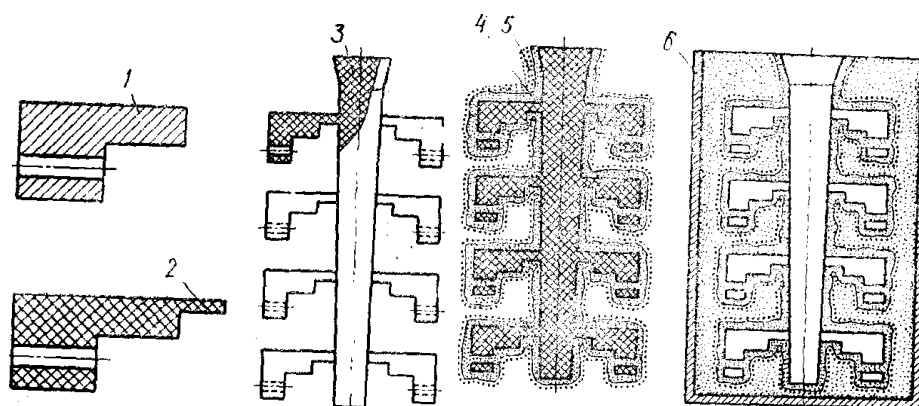


Рисунок 9.1 – Литье по выплавляемым моделям

Прилипая к сырой пленке, песок образует огнеупорный слой, который сушат либо на воздухе, либо помещая блок моделей в аммиачную камеру для ускоренной химической сушки. Когда слой высыхает, операции окунания, посыпания песком и сушки повторяют от 3 до 5 раз. Послесушки последнего огнеупорного слоя получают форму в виде многослойной оболочки с заформованными легкоплавкими моделями. Форму помещают в сушильный шкаф и выдерживают при температуре более 100 °С или погружают в горячую воду. Модели и элементы литниковой системы (стояк и питатели) плавятся и вытекают из формы. Для выжигания остатков модельного состава из полости, а также для упрочнения оболочки полученную литейную форму в металлическом ящике 6 засыпают металлической дробью и помещают в термическую печь, где обжигают при температуре 800-900 °С. Заливку металла производят в горячую форму, что дает возможность получать тонкостенные сложной конфигурации отливки. Выбивку отливок и отделение литников осуществляют на виброустановках.

9.2 Изготовление отливок литьем по выжигаемым моделям

Кроме выплавляемых моделей в литейном производстве используют выжигаемые модели при изготовлении ответственных отливок массой до 3,5 т из чугуна, стали и цветных сплавов в единичном производстве. Для изготовления выжигаемых моделей используют пенополистирол, который в 50-100 раз легче древесины, легко режется горячей проволокой и легко склеивается (рисунок 9.2).

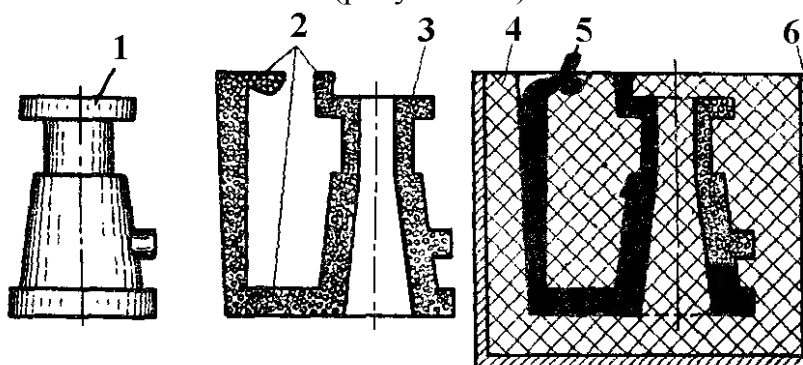


Рисунок 9.2 – Литье по выжигаемым моделям

Склеиванием можно получить полистироловые выжигаемые модели самой сложной конфигурации. Этот метод отличается большой точностью и экономией металла из-за отсутствия формовочных уклонов.

На рисунке 9.2 приведен чертеж отливки 1 и выжигаемой пенополистироловой модели 3 с приклеенными к ней пенополистироловыми элементами литниковой системы 2. Модель с литниковой системой заформовывают песчано-глинистой смесью 4 в металлическом ящике 6. Во время заливки модель с литниковой системой остается в форме и жидкий металл 5 выжигает их и одновременно заполняет полость формы.

9.3 Изготовление отливок литьем в оболочковые формы

Сущность метода и область применения. Сущность заключается в том, что разовую литейную форму изготавливают в виде оболочки, используя для формовочной смеси в качестве связующего материала фенольные терморезистивные смолы, прочно цементирующие мелкий кварцевый песок, являющийся наполнителем. Изготовление оболочковой формы исключает потребность в опоках, резко снижает расход формовочной смеси, легко механизмуется и автоматизируется. Использование формовочной смеси, состоящей из 92-95% мелкого кварцевого, магнезитового или циркониевого песка и 4-6% терморезистивной фенолформальдегидной смолы, обеспечивает малую шероховатость поверхности и более высокую точность отливок (5-8 класса), чем изготовленных в песчано-глинистых формах, так как оболочка твердеет на модели и сохраняет ее размеры.

Литье в оболочковые формы применяют в крупносерийном и массовом производстве при получении ответственных фасонных мелких и средних отливок из различных сплавов.

Технология изготовления оболочковой формы (рисунок 9.3) начинается с нанесения пульверизатором на металлическую модельную плиту разделительного состава, облегчающего снятие оболочки. Затем модельную плиту нагревают в электрической печи до температуры 200-220 °С (рисунок 9.3а), устанавливают над бункером и закрепляют моделью вниз (рисунок 9.3б). Бункер переворачивают на 180°, и формовочная смесь падает на нагретую модельную плиту (рисунок 9.3в).

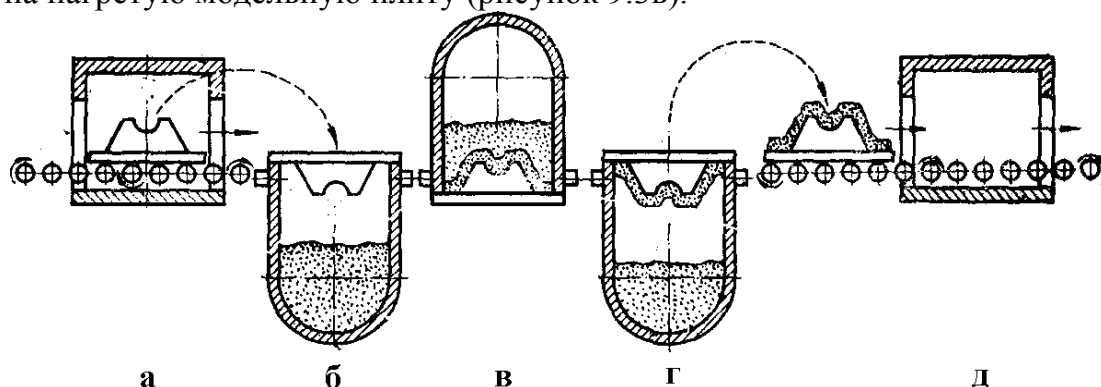


Рисунок 9.3 – Схема изготовления оболочковых форм

При выдержке в течение 20-30 с смола плавится и, обволакивая тонкой пленкой мелкие зерна песка, образует оболочку толщиной 6-8 мм. Бункер возвращают в исходное положение, и не прореагировавшая формовочная смесь падает на его дно (рисунок 9,3г). Снятую с бункера модельную плиту с непрочной оболочкой отправляют в электрическую печь с температурой около 350 °С (рисунок 9.3д). Смола в течение 90-180 с полимеризуется и необратимо твердеет, образуя прочную оболочковую полуформу. По такой же технологии изготавливают другую полуформу.

Для снятия готовой оболочковой полуформы (рисунок 9.4) модельная плита 1 с закрепленной полумоделью 3 снабжена толкателями 4, находящимися на уровне плиты, и

толкателями 2, которые выступают из нее и образуют в полуформе углубления. На другой модельной плите толкатели расположены на несколько миллиметров ниже плоскости разъема, чтобы образовать выступы на второй полуформе против углублений на первой. С помощью этих выступов и углублений фиксируют положение полуформ при сборке оболочковой формы. При нажатии на плиту 6 толкатели снимают полуформу 5 с модельной плиты. В одной из полуформ на стержневые знаки устанавливают стержень, закрывают другой полуформой, скрепляют их скобами, струбцинами или склеивают по плоскости разъема. Собранную оболочковую форму 7 помещают в металлический ящик 8, засыпают крупным песком или чугушной дробью 9 и заливают металлом (рисунок 9.4). К моменту полной кристаллизации металла отливки смола из смеси выгорает, форма и стержни разупрочняются и легко разрушаются, освобождая отливку при выбивке.

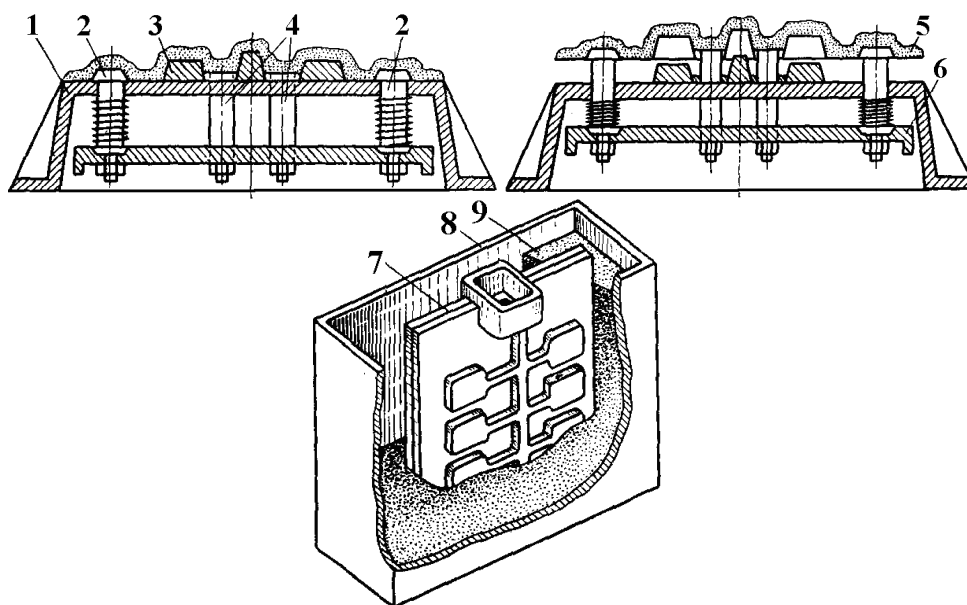


Рисунок 9.4 – Модельная плита с оболочковой полуформой и собранная форма

9.4 Изготовление отливок в металлических формах

Сущность метода и область применения. Сущность заключается в том, что вместо разовой песчано-глинистой формы используют металлическую, называемую кокилем. Обладая по сравнению с песчано-глинистыми формами приблизительно в 60 раз более высокой теплопроводностью, кокили обеспечивают мелкозернистую структуру отливок, что повышает их прочность. При кокильном литье отпадает необходимость в модельно-опочной оснастке, в формовочных и стержневых смесях, что не только дает большую экономию, но и снижает количество пыли и улучшает санитарные условия труда; повышается точность и чистота поверхности отливки; обслуживание кокилей не требует рабочих высокой квалификации; значительно повышается производительность и уменьшаются необходимые производственные площади. Технологический процесс кокильного литья можно легко механизировать. Механизированные кокили имеют устройство, позволяющее закрывать и открывать их от пневматического или гидравлического привода. При массовом производстве несколько кокильных машин устанавливают на вращающиеся карусели, поворачивающиеся на необходимый угол через определенное время, за которое производится заливка кокиля.

Наряду с преимуществами у кокильного литья есть и недостатки: высокая стоимость кокилей позволяет использовать их только в серийном и массовом производствах;

опасность образования трещин в отливках из-за неподатливости металлического кокиля; чугунные отливки в кокиле получают отбеленными и требуют длительного отжига, что удорожает их производство.

Кокильное литье применяют в условиях крупносерийного и массового производства при изготовлении несложных по конфигурации отливок с толщиной стенок 3-100 мм из чугуна, стали и цветных металлов.

Конструкция кокиля. По конструкции различают кокили неразъемные вытряхные (рисунок 9.5,а) и разъемные с горизонтальным (рисунок 9.5,б) и вертикальным (рисунок 5в) разъемами.

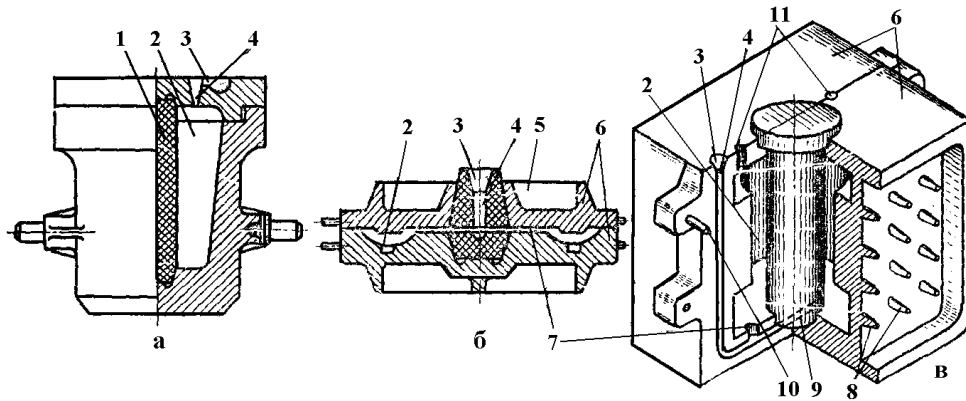


Рисунок 9.5 – Металлические формы (кокили)

Разъемные кокили состоят из двух половин 6, центрирующихся направляющими штырями 10. Чтобы избежать коробления, кокиль снабжают ребрами жесткости 5 либо делают коробчатой формы. На наружной стенке кокиля для его ускоренного охлаждения иногда отливают пальцы 8. Отверстие или внутреннюю полость в отливке образует песчаный стержень 1 либо металлический 9. Металл заливают в литниковую чашу 3, и по стояку 4 и питателям 7 он заполняет полость формы 2. Для избегания образования в отливке трещин металлические стержни удаляют из формы до начала усадки металла. Если внутренняя конфигурация отливки очень сложна, то металлические стержни делают из нескольких частей или заменяют песчаными. ЛПС размещается в плоскости разъема кокиля. Для выхода воздуха из формы во время ее заливки кроме выпоров 11 в плоскости разъема по всей высоте кокиля прорезают щели глубиной 0,3-0,5 мм.

Изготавливают кокили из серого чугуна, стали, а также из цветных сплавов литьем с последующей механической обработкой.

Особенности технологии изготовления отливок в кокилях. Изготовление отливок в кокиле состоит из таких операций: очистка кокиля от старой облицовки; нанесение огнеупорного защитного покрытия или покраска рабочей поверхности кокиля; сборка формы с установкой стержней; заливка кокиля; выдержка отливки в форме; раскрытие кокиля и удаление из него отливки.

Во избежание отбеливания чугунных отливок подбирают химический состав чугуна, обеспечивающий графитизацию в условиях повышенной скорости охлаждения. С этой же целью перед заливкой чугуна кокиль нагревают до 250-300 °С и время выдержки отливок в кокиле сокращают до минимума.

Если в кокиле получают отливки из силумина (сплав алюминия с кремнием), то отпадает необходимость вводить натрий в сплав перед заливкой формы для измельчения структуры, так как быстрое охлаждение измельчает кремний в образующейся эвтектике.

При получении в кокиле отливок из сплавов на медной основе полость формы покрывают жирными красками. Между расплавом и кокилем образуется газовая прослойка, которая устраняет образование пригара на поверхности отливки.

9.5 Изготовление отливок литьем под давлением

Сущность метода и область применения. Сущность состоит в том, что жидким металлом принудительно заполняют металлическую пресс-форму под давлением, которое поддерживают до полной кристаллизации отливки. Давление обеспечивает быстрое и хорошее заполнение формы, высокую точность и малую шероховатость поверхности отливки. Принудительное питание отливки жидким металлом исключает возможность образования усадочных раковин, пористости и не требует установки прибылей. Ускоренная кристаллизация металла в металлической пресс-форме под давлением обуславливает образование мелкозернистой структуры. Благодаря внешнему давлению растворенные в металле газы остаются в твердом растворе, что снижает газовую пористость металла. Отливки, полученные этим методом, как правило, не имеют припусков на механическую обработку и после удаления из формы являются готовыми деталями. Литьем под давлением можно получать отливки с толщиной стенки до 0,5 мм, сложной конфигурации и с отверстиями диаметром до 1 мм.

Высокая стоимость пресс-форм, имеющих сложную конфигурацию и требующих высокой точности изготовления, обуславливает целесообразность применения литья под давлением только в крупносерийном и массовом производствах тонкостенных отливок достаточно сложной конфигурации из сплавов цветных металлов массой до 50 кг.

Оборудование и технология литья под давлением. Литье под давлением осуществляют на компрессорных и поршневых машинах высокой производительности, дающих 200-400 отливок в час (рисунок 9.6). Поршневые машины выпускают с горячей или холодной камерой сжатия, расположенной горизонтально или вертикально. Машины с горячей камерой сжатия, в которых камера находится непосредственно в расплаве, применяют для получения отливок из сплавов с низкой температурой плавления на основе цинка, олова и свинца. Машины с холодной камерой сжатия, в которых камера вынесена за пределы расплава, используют для получения отливок из более тугоплавких цветных сплавов на основе меди, алюминия и магния.

На машинах с вертикальной холодной камерой сжатия (рисунок 9.6,а) расплав 4 заливают в камеру сжатия 5 (положение I).

Верхний поршень 1, опускаясь, давит на расплав и на нижний поршень 10, который при движении вниз открывает литниковый канал 3. Металл заполняет полость 2 пресс-формы, состоящей из двух половин 6 и 7 (положение II). Объем жидкого металла должен быть больше объема полости формы, чтобы между верхним и нижним поршнем оставался избыток металла. Давление верхнего поршня поддерживают до полной кристаллизации отливки, после чего пресс-форму раскрывают и отливку 9 вместе с литником 12 выталкивают из формы толкателями 8. Нижний поршень выталкивает наружу избыток металла 11 (положение I), и его отправляют в переплав.

На рисунке 9.6,б показана работа машины с горизонтальной холодной камерой сжатия. Все операции на ней выполняются в той же последовательности.

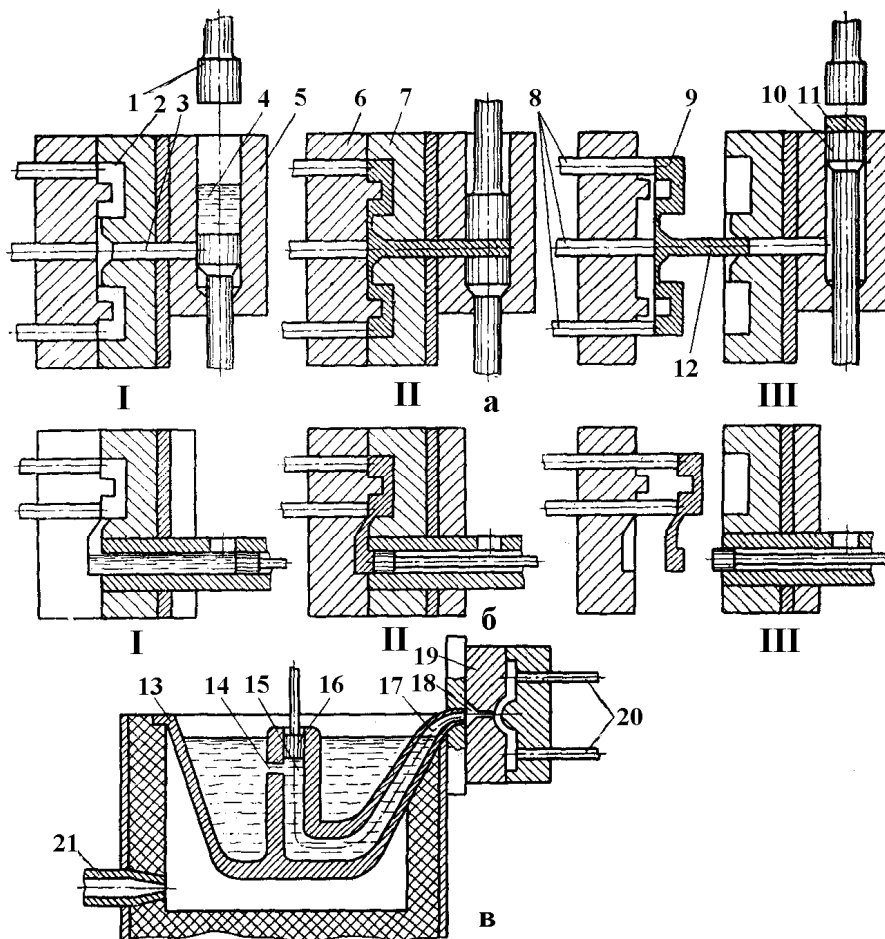


Рисунок 9.6 – Схемы поршневых машин для литья под давлением

На (рисунке 9.6,в) приведена схема работы поршневой машины с горячей камерой сжатия. Чугунный тигель 13 с жидким металлом все время подогревают снизу газом через форсунку 21. Перед заливкой пресс-форму 19 закрывают и мунштук 18 соединяется с каналом 17. При верхнем положении поршня 16 через отверстие 14 сплав заполняет камеру сжатия 15 и канал. При движении вниз поршень впрессовывает жидкий металл в полость формы. После затвердевания металла давление снимают, поршень движется вверх, форму раскрывают и отливку выталкивают толкателями 20. Машины с горячей камерой сжатия более производительны и расходуют меньше жидкого металла, однако их нельзя применять для литья сплавов с температурой плавления более $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за быстрого изнашивания поршня.

В машинах с холодной камерой сжатия поршень контактирует с расплавом в течение короткого промежутка времени и поэтому мало изнашивается. Здесь можно значительно повысить давление, что гарантирует высокую плотность и прочность отливок. Если в машинах с горячей камерой сжатия давление достигает 20 МПа, то в машинах с холодной камерой сжатия при литье алюминиевых и медных сплавов давление может достигать 100-300 МПа.

9.6 Изготовление отливок центробежным литьем

Сущность метода и область применения. Сущность состоит в том, что жидкий металл заливают во вращающуюся с определенной скоростью литейную форму. Она вращается в течение всего времени кристаллизации металла отливки. При этом металл центробежной силой прижимается к стенкам формы, что обеспечивает получение плотных, с повышенной прочностью отливок, так как газы и шлак, обладающие меньшей плотностью в результате сепарации, вытесняются во внутренние полости отливки и затем их удаляют механической обработкой (рисунок 9.7).

Ось вращения формы может быть горизонтальной, вертикальной и наклонной. Если диаметр отливки значительно меньше ее длины (трубы, гильзы, втулки), то ось вращения формы размещают горизонтально (рисунок 9.7а). Если же диаметр отливки больше, чем ее высота (колеса, шкивы, шестерни), то ось вращения располагают вертикально (рисунок 9.7б). В обоих случаях ось отливки совпадает с осью вращения формы и внутренняя полость получается без стержней, а толщина стенки отливки определяется количеством заливаемого металла. Этот способ используют при изготовлении отливок, имеющих форму тела вращения. При изготовлении мелких фасонных отливок ось вращения формы может не совпадать с осью отливки. В этом случае внутренние полости образуют с помощью стержней, а металл заливают в центральный общий литник, из которого по радиально расположенным питателям он попадает в полость формы (рисунок 9.7в). Такой способ называется центрифугированием.

Использование высокопроизводительных центробежных установок, отсутствие стержней и работ, связанных с их производством, намного повышает производительность труда, а отсутствие ЛПС и прибылей значительно экономит металл.

Центробежное литье применяют в массовом, серийном и единичном производстве отливок из различных сплавов в металлических и песчаных формах. Этим способом отливают трубы, цилиндрические втулки, гильзы автотракторных двигателей, заготовки для поршневых колец, шестерни, шкивы, орудийные стволы, а также получают двухслойные (биметаллические) отливки, поочередно заливая форму различными сплавами.

Центробежный способ получения литых чугунных труб является самым распространенным. На рисунке 9.7, г приведена схема центробежной машины. Металлическая форма 3 вращается электродвигателем 1 и охлаждается водой. Форма установлена на рельсовой тележке с уклоном 2-5°. Жидкий чугун из ковша 5 по неподвижному желобу 4 попадает в форму. Форма, помимо вращения, по мере заполнения металлом перемещается влево. В крайнем левом положении форма продолжает вращаться до полной кристаллизации металла. Затем форма возвращается в исходное положение вправо, а труба вместе со стержнем 2 (образующим раструб трубы) удаляется из формы клещами влево.

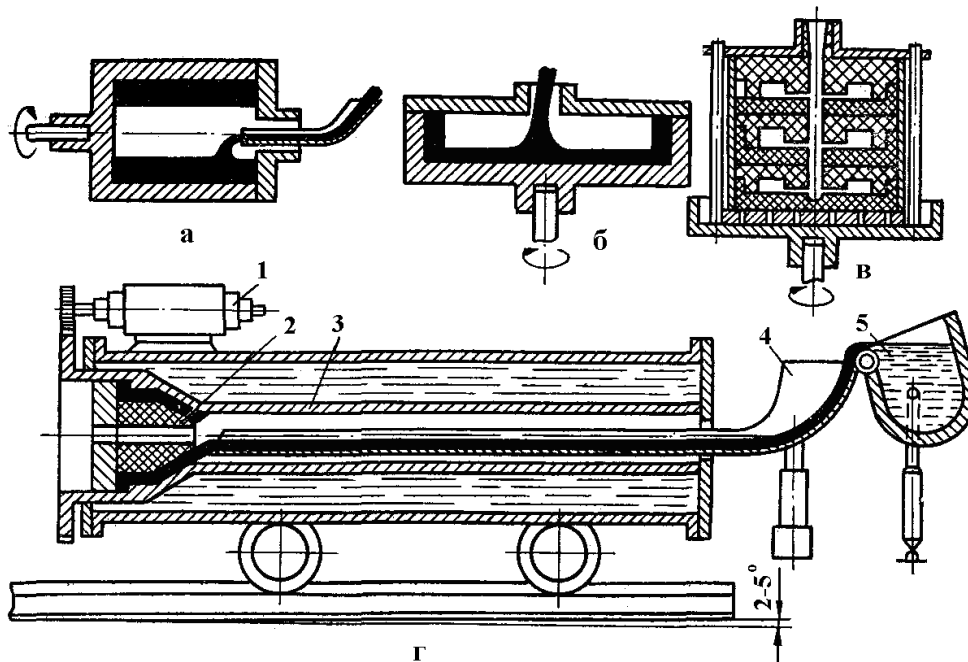


Рисунок 9.7 – Схемы центробежного литья

В труболитейных цехах успешно эксплуатируют линии центробежного литья чугунных труб диаметром 80-125, 100-150 и 200-400 мм с автоматическими установками для изготовления стержней раструба. Поверхность труб при этом получается отбеленной, и возникают значительные внутренние напряжения. Поэтому после удаления из формы трубы отжигают при температуре 850-920 °С.

Контрольные вопросы для самопроверки

- 1 Перечислите основные способы литья в чем их преимущества?
- 2 Опишите метод литья по выплавляемым моделям.
- 3 Опишите метод литья выжиганием.
- 4 Опишите метод литья в оболочковые формы.
- 5 Опишите метод изготовления отливок в металлические формы (кокили).
- 6 Опишите метод литья под давлением.
- 7 Опишите метод центробежного литья.

Библиографический список

1. Романов Л.М., Болдин А.Н. Литейные сплавы и плавка. Производство отливок из чугуна и стали: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2005. - 48 с.
2. Вернер А.К., Курбатова И.А., Парфеновская О.А. Технология конструкционных материалов: Краткий курс лекций. – М.: МГИУ, 2005. - 135 с.
3. Шульте Ю. А. Электрометаллургия стального литья. – М.: Металлургия, 1970. – 192 с.
4. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. / В.М. Воздвиженский, В.В.Спасский, В. А. Грачев и др. – М.: Машиностроение, 1984. - 434 с.
5. Василевский П.Ф. Технология стального литья. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.
6. Гуляев А.П. Металловедение, 5-е издание. – М.: Металлургия. - 647с.
7. Иванов В. Н. Словарь - справочник по литейному производству. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
8. Братковский Е.В., Исагулов А.З., Смолькин А.А. Современные способы выплавки чугуна и стали в литейном производстве. – Караганда: Карагандинский Государственный технический университет, 1997. - 123 с.
9. Литейное производство. / Под редакцией А.М. Михайлова – М.: Машиностроение, 1987. - 319 с.
10. Братковский Е.В., Воронцов В.И., Козлов Л.Я. Основы производства и обработки металлов. Производство отливок из чугуна и стали: лабораторный практикум. – М.: МИСиС, 2002. - 55с.

БРАТКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ,
ЗАВОДЯНЫЙ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Учебное пособие по дисциплине
«Литейное производство»
для бакалавров, обучающихся по направлению
22.03.02 «Металлургия»

Подписано в печать 19.10.2016 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 88	Печать цифровая Тираж 50 экз.	Уч.-изд.л. 8,75

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359 Оренбургская обл. г. Новотроицк ул. Фрунзе 8.

Email: nfmisis@yandex.ru

Контактный тел. 8(3537) 679729