



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Металлургия черных и цветных сплавов»

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Пособие

Минск
БНТУ
2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Металлургия черных и цветных сплавов»

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Пособие

к лабораторным работам для студентов специальности 1-42 01 01
«Металлургическое производство и материалобработка
(по направлениям)»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2021

УДК 621.74:[669.14+669.16](076.5)(075.8)

ББК 34.327я7

П80

С о с т а в и т е л и:

А. Г. Слуцкий, И. Л. Кулинич

Р е ц е н з е н т ы:

зав. кафедрой «Материаловедение и проектирование систем»
Белорусского государственного технологического университета,
канд. техн. наук, доцент *Д. В. Куис*;
ведущий сотрудник ООО «ПОЛИТЕГ-МЕТ»
канд. техн. наук, доцент *В. А. Розум*

Производство отливок из сплавов на основе железа: пособие
П80 к лабораторным работам для студентов специальности 1-42 01 01
«Металлургическое производство и материалобработка (по направ-
лениям)» / сост.: А. Г. Слуцкий, И. Л. Кулинич. – Минск : БНТУ,
2021. – 91 с.

ISBN 978-985-583-644-6.

Пособие содержит необходимую информацию для подготовки студен-
тов к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Производство от-
ливок из сплавов на основе железа», определяет порядок работы и форму
отчетов.

УДК 621.74:[669.14+669.16](076.5)(075.8)

ББК 34.327я7

ISBN 978-985-583-644-6

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5

РАЗДЕЛ 1. ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА..... 7

Лабораторная работа № 1
Изучение формирования микроструктуры чугунов..... 7

Лабораторная работа № 2
Получение серого чугуна в индукционной печи.
Изучение микроструктуры, технологических
и механических свойств..... 16

Лабораторная работа № 3
Получение чугуна с шаровидным графитом..... 22

Лабораторная работа №.4
Получение ковкого чугуна..... 30

Лабораторная работа № 5
Графитизирующее модифицирование серого чугуна 34

РАЗДЕЛ 2. ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ..... 38

Лабораторная работа № 1
Изучение формирования микроструктуры стали 38

Лабораторная работа № 2
Термообработка отливок из среднеуглеродистой стали..... 46

Лабораторная работа № 3
Плавка углеродистой стали в индукционной печи 52

Лабораторная работа № 4
Плавка стали в кислой электродуговой печи..... 56

Лабораторная работа № 5
Структура и свойства высоколегированной
марганцовистой стали 62

| | |
|---|----|
| Лабораторная работа № 6 | |
| Структура и свойства инструментальной стали 5ХНМ..... | 64 |
| Лабораторная работа № 7 | |
| Структура и свойства высоколегированной хромоникелевой жаропрочной стали аустенитного класса..... | 71 |
| Лабораторная работа № 8 | |
| Электрошлаковое литье стали..... | 77 |
| Лабораторная работа № 9 | |
| Плавка стали в вакуумной индукционной печи | 81 |
| Список использованных источников..... | 90 |

Введение

Пособие включает в себя тринадцать лабораторных работ по всем разделам курса «Производство отливок из сплавов на основе железа» для специальностей 1-42 01 01 и 1-42 01 02 дневной формы обучения.

Целью лабораторных работ является закрепление теоретического материала курса, а также ознакомление студентов с особенностями формирования структуры железоуглеродистых сплавов, процессов модифицирования и легирования железоуглеродистых сплавов, с технологическими процессами плавки чугуна и стали различного состава, термической обработки. Большое внимание уделяется приобретению студентами навыков ведения самостоятельной научно-исследовательской работы, правильного анализирования и обобщения полученных результатов.

Для осмысленного выполнения работ студент должен предварительно изучить теоретические положения по данному вопросу, детально разобраться в методике исследования, работе приборов и оборудования, методических указаниях о порядке выполнения работы.

Перед началом работы студенты получают инструктаж по охране труда и расписываются в соответствующем журнале.

Лабораторные работы проводятся под руководством преподавателя и лаборанта.

Студенты, пропустившие лабораторную работу, выполняют ее в конце семестра по особому расписанию.

Студент, не защитивший лабораторные работы в установленный срок, не получает зачет и не допускается к экзаменам.

Правила охраны труда и противопожарной безопасности при выполнении лабораторных работ

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие требования:

1. Лабораторные работы проводятся по подгруппам, не превышающим 12–15 человек.
2. Перед выполнением лабораторных работ студенты обязаны ознакомиться с правилами охраны труда и противопожарной безо-

пасности в лаборатории и на рабочих местах, расписаться в журнале регистрации инструктажа по охране труда.

3. Преподаватель, ведущий занятия, обязан перед началом каждой лабораторной работы напомнить студентам о правилах охраны труда и безопасных приемах работы на лабораторном оборудовании.

4. При работе с электрооборудованием студенты обязаны выполнять правила электробезопасности и пользоваться предусмотренными для этой цели защитными средствами.

5. Работать на приборах и оборудовании студенты могут только под наблюдением преподавателя или лаборанта.

6. Студентам запрещается включать приборы и механизмы самостоятельно, без наблюдения преподавателя и лаборанта.

7. Взятие навесок и другие операции следует производить специальными инструментами.

8. Перед проведением испытаний студенты обязаны ознакомиться с работой лабораторного оборудования по настоящему практикуму и соответствующим инструкциям.

9. К лабораторным работам допускаются студенты, овладевшие правилами и порядком их выполнения.

10. По окончании работы следует тщательно убрать свое рабочее место.

РАЗДЕЛ 1

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ

Цель работы: изучение формирования микроструктуры высокоуглеродистых сплавов железа по стабильной и метастабильной диаграммам.

Необходимое оборудование и материалы: металлографический микроскоп, комплект образцов высокоуглеродистых сплавов железа.

Общие сведения

К чугунам относятся сплавы железа с углеродом, если его концентрация превышает 2,11 % С согласно диаграмме «железо-углерод» (рис. 1.1).

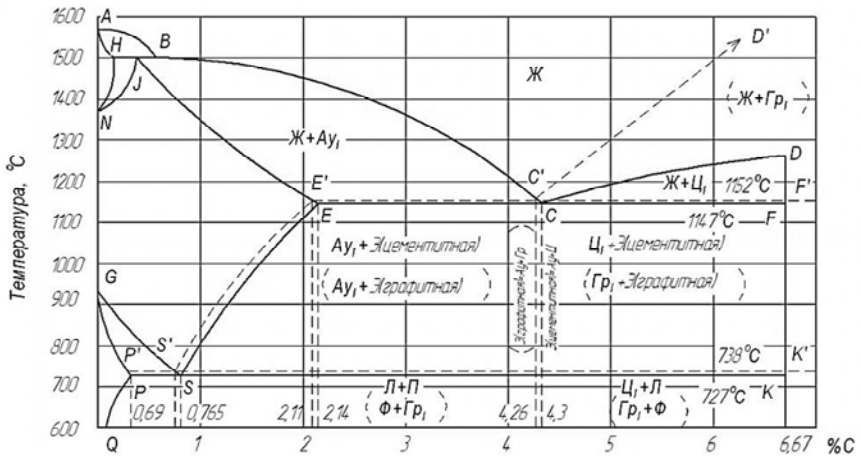


Рис. 1.1. Диаграмма «железо-углерод»

Обычно в чугунах содержится и ряд примесей (кремний, марганец, сера, фосфор и др.). Их влияние на изменение положения сплава относительно равновесной диаграммы состояния Fe-C можно учесть с помощью углеродного эквивалента $S_{экв.} = \% C + 1/3 (\%Si + \%P)$. Это позволяет ориентировочно рассматривать структурообразование не по сложным многокомпонентным диаграммам, а по двойной Fe-C.

Затвердевание высокоуглеродистых сплавов железа может происходить по стабильной (Fe-C) или метастабильной (Fe-Fe₃C) диаграммами состояния. В первом случае при эвтектическом превращении углерод выделяется в виде самостоятельной фазы пластинчатой или компактной формы, а во втором – образует соединение Fe₃C (цементит). Метастабильность цементита как фазы заключается в том, что при высоких температурах он неустойчив и разлагается по реакции $Fe_3C \rightarrow Fe + C$.

Атомы углерода диффундируют в железе и скапливаются в отдельных микрообъемах, образуя включения компактной формы, чаще всего – хлопьевидные.

Особым случаем затвердевания жидкого чугуна является кристаллизация с одновременным образованием микроструктур, характерных как для стабильной, так и для метастабильной диаграмм. Такие чугуны называются половинчатыми (с «отбелом» или с «отсером»). На рис. 1.2 представлены фотографии макроструктуры чугунных образцов.



Рис. 1.2. Фотографии макроструктуры серого (а), половинчатого (б), белого (в) чугунов

Рассмотрим более подробно процесс формирования структуры чугуна при затвердевании.

1. Стабильная диаграмма «железо-углерод»

1.1. Образование первичных фаз

Затвердевание чугуна по стабильной Fe-C диаграмме обусловливается рядом факторов, важнейшими из которых являются наличие в расплаве центров кристаллизации графита, скорость охлаждения, величина перегрева расплава, влияние примесей. По стабильной диаграмме кристаллизуются чугуны с пластинчатым графитом.

Проанализируем процесс затвердевания доэвтектического (I), эвтектического (II) и заэвтектического (III) чугуна (рис. 1.3).

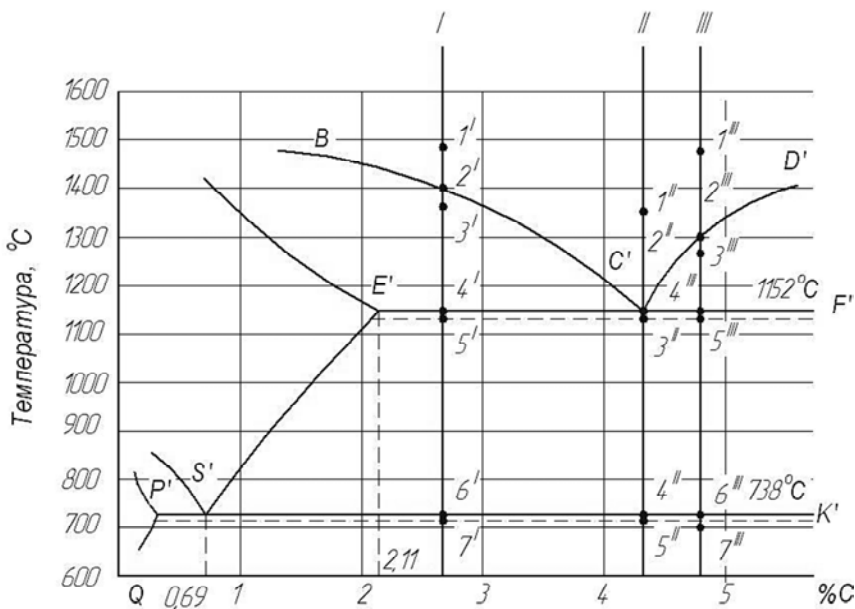


Рис. 1.3. Диаграмма «железо-углерод» (стабильная)

В точках 1', 1'', 1''' сплавы I, II III находятся в жидком состоянии. Атомы углерода и железа равномерно располагаются в объеме расплава. При пересечении линии BC'D' сплавы находятся в предкристаллизационном состоянии, твердая фаза еще не образуется.

Кристаллизация начинается при переохлаждении сплавов несколько ниже линии ликвидус $BC^I D^I$, точки 3^I , 3^{II} , 3^{III} . В жидкой фазе сплава I начинают расти разветвленные кристаллы дендритов предэвтектического аустенита (Au_1), а в сплаве III – первичного графита (Gr_1).

Состав дендритов первичного аустенита сплава I не однороден. В процессе охлаждения он изменяется и на линии $E^I C^I F^I$ (точка 4^I) в сплаве имеются твердые кристаллы аустенита содержащего 2,11 % C (точка E^I) и некоторое количество жидкости в точке C^I (4,26 % C).

Первичный графит в сплаве III состоит практически на 100 % из углерода. По мере его выделения от точки 3^{III} до точки 5^{III} жидкий раствор обедняется углеродом и к началу эвтектической реакции в сплавах III имеются 2 фазы: твердая – графит и жидкая – с содержанием углерода – 4,26 %.

1.2. Эвтектическое превращение

С переохлаждением сплавов I, II, III несколько ниже линии $E^I C^I F^I$ до точек $5^I, 3^{II}, 5^{III}$ начинается затвердевание остатка жидкой фазы с одновременным выделением аустенита и графита в виде эвтектики.

Эвтектическое превращение рассмотрим на примере затвердевания сплава II. Кристаллизация начинается при некотором переохлаждении ниже эвтектической линии $E^I C^I F^I$ точка 3^{II} с образованием двух твердых фаз – графита и аустенита.

В процессе дальнейшего охлаждения эти фазы взаимно прорастают друг в друге, образуя эвтектическую колонию.

В сплаве I (доэвтектическом) на строение эвтектических колоний накладывают свое влияние дендриты первичного аустенита, поскольку остаток жидкости эвтектического состава находится в междендритном пространстве. Это может вызвать кристаллизацию графита различной формы.

В сплаве III (заэвтектическом) формирование эвтектических колоний начинается как на базе первичного графита, так и независимо от него (аналогично сплаву II).

Структура чугуна любого состава, кристаллизующегося по стабильной диаграмме, после завершения эвтектического превращения содержит аустенит и графит. В заэвтектическом чугуне имеются кристаллы первичного графита в виде грубых пластин или слабо разветвленных розеток и более мелкого графита, образовавшегося

при эвтектическом превращении. Количество графита определяется концентрацией углерода в составе сплава, а его форма – технологическими особенностями получения отливок и присутствующими в чугуне примесями.

1.3. Структурные превращения в твердом состоянии по стабильной диаграмме Fe-C

С понижением температуры после завершения эвтектического превращения растворимость углерода в аустените уменьшается. Аустенит обедняется углеродом в соответствии с линией E/S' , а выделяющийся углерод мигрирует к имеющимся включениям графита и осаждается на них. При охлаждении сплавов I, II, III до температуры эвтектоидного превращения точки $6'$, $4''$, $6'''$ на линии $P'S'K'$ состав аустенита соответствует т. S' (0,69 % C) (рис. 1.3).

Строение металлической основы связано с эвтектоидным превращением и обуславливается, преимущественно, временем и длиной пути диффузии атомов углерода при распаде аустенита. Чем меньше скорость охлаждения и короче пути диффузии, тем большее количество атомов углерода сможет продиффундировать к включениям графита.

Аустенит распадается несколько ниже температуры эвтектоидного превращения (точки $7'$, $5''$, $7'''$ по схеме $AuT S' \rightarrow \Phi + Gr$).

Первым выделяется эвтектоидный графит, который наслаивается на уже имеющихся включениях графита. Эвтектоидный феррит выделяется на обедняющейся углеродом границе раздела графита с аустенитом. Обоеднение аустенита углеродом и, следовательно, обогащение железом, создает условия для роста феррита.

При неблагоприятном сочетании вышеназванных факторов эвтектоидное превращение может происходить по следующей схеме: $AuT S' \rightarrow \Phi + \Psi = \Pi$, т. е. образуется перлитная металлическая основа с включениями графита.

Если часть аустенита распадается на феррит и графит, а другая часть – на феррит и цементит (перлит), то такие чугуны будут иметь феррито-перлитную матрицу с включениями графита. В качестве примера на рис. 1.4 представлены микроструктуры серого чугуна с различной металлической основой.

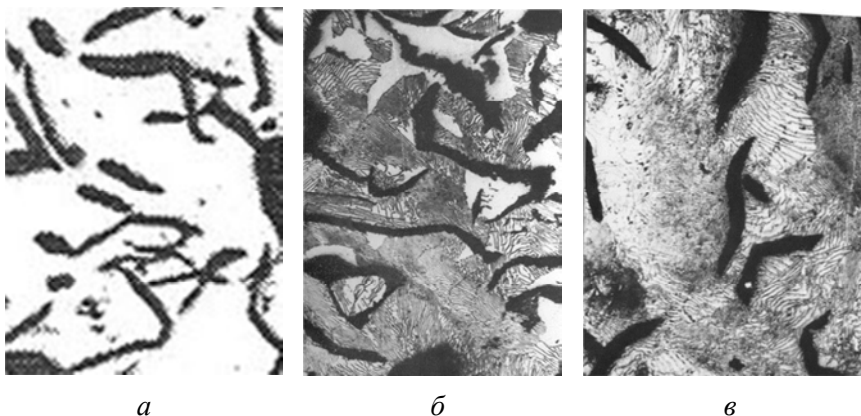


Рис. 1.4. Микроструктура ферритного (а), феррито-перлитного (б) и перлитного (в) серого чугуна

Метастабильная диаграмма «железо-углерод»

Трудности зарождения и роста графитных включений являются основной причиной, вызывающей кристаллизацию высокоуглеродистой фазы в виде цементита.

Структурно-свободный цементит придает излому чугуна светлый блестящий цвет, по которому сплав получил название «белый чугун».

Кристаллизация первичных фаз и эвтектическое превращение

Рассмотрим формирование микроструктуры доэвтектического (I), эвтектического (II) и заэвтектического (III) чугуна по метастабильной диаграмме Fe-Fe₃C (рис. 1.5).

При температурах выше линии BCD чугун находится в жидком состоянии. При некотором переохлаждении чугуна (точки 3' и 3''') начинается выделение дендритов первичного аустенита в сплаве I и кристаллов первичного цементита в сплаве III. Кристаллизация этих фаз продолжается до температуры эвтектического превращения 1147 °С соответственно.

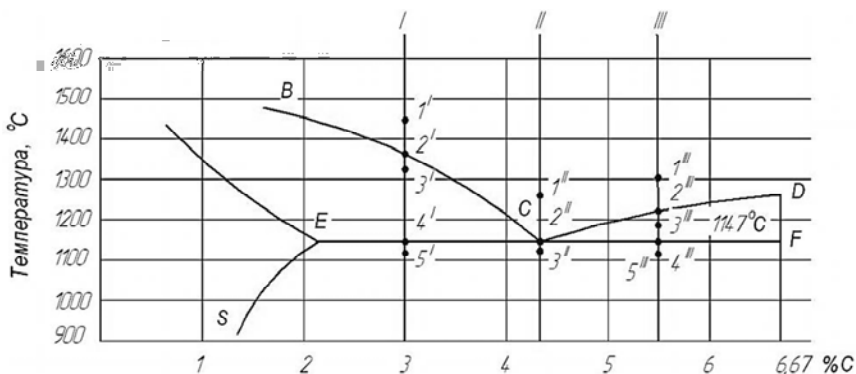


Рис. 1.5. Диаграмма железо-цементит (метастабильная)

Несколько ниже эвтектической линии ECF точки $5'$, $3''$, $5'''$ остаток жидкости затвердевает по схеме Жт.С → Аут.Е + Ц, формируя дисперсную двухфазную эвтектику, которая называется ледебурит (Л).

Механизм процесса эвтектического превращения рассмотрим более детально на примере сплава II. При переохлаждении чугуна эвтектического состава до точки $3''$ жидкий раствор одновременно пересыщается железом и углеродом. Фазой, инициирующей формирование ледебурита, является цементит. Ледебуритная колония растет до полного исчезновения жидкости.

В сплавах I и III затвердевание остатка жидкости протекает по аналогичной схеме. В результате в сплавах формируется следующая микроструктура:

в доэвтектическом чугуне – первичный аустенит и цементитная эвтектика (аустенит + цементит эвтектический);

в эвтектическом чугуне – цементитная эвтектика (аустенит + цементит эвтектический);

в заэвтектическом чугуне – цементит первичный и цементитная эвтектика (аустенит + цементит эвтектический).

Структурные изменения после затвердевания

При охлаждении сплавов I, II, III до температуры эвтектоидного превращения (727 °С, линия PSK) растворимость углерода в аустените уменьшается, что отражается точками на линии ES (рис. 1.1).

В результате этого в сплавах возникают объемы, пересыщенные углеродом, достаточные для выделения цементита. В зависимости от скорости охлаждения вторичный цементит может нарастать на имеющемся цементите и наряду с этим расти в аустените в виде пластин.

Переохлаждение чугуна до температуры несколько ниже линии PSK вызывает распад аустенита белого чугуна, имеющего состав т. S по следующей схеме: $\text{Ауст. S} \rightarrow \Phi + \text{Ц} = \text{П}$.

Перлитное превращение претерпевает весь аустенит (первичный и эвтектический). Следовательно, ниже 727°C ледебурит представляет собой смесь цементита и перлита.

Микроструктура чугуна при комнатной температуре состоит:

- в доэвтектическом чугуне – из ледебурита и перлита;
- в эвтектическом – из ледебурита;
- в заэвтектическом – из цементита первичного и ледебурита.

Структурообразование в половинчатых чугунах

Если чугун охлаждается со скоростью, недостаточной для полного затвердевания в соответствии с метастабильной диаграммой состояния, но более высокой, чем это необходимо для затвердевания в соответствии со стабильной диаграммой, возможно одновременное выделение и графита, и цементита. Такой чугун называют половинчатым. В большой степени появлению названных фаз могут способствовать перегрев расплава, наличие примесей, модифицирование.

В доэвтектических и эвтектических сплавах структура половинчатого чугуна образуется в процессе эвтектического превращения, когда одна часть жидкой фазы затвердевает с образованием графита и аустенита, а другая – цементита и аустенита. При этом возможно протекание эвтектического превращения по двум вариантам. Вначале зарождаются и растут эвтектические колонии графит + аустенит, а затем выделяется ледебурит. В этом случае основной объем жидкости распадается на цементит и аустенит, так как скорость роста ледебурита значительно превышает скорость роста графитной эвтектики. Если же переохлаждение ниже линии ECF, то скорость роста цементитной эвтектики мала и за это время зарождается большое число центров кристаллизации графита. Вследствие этого остаток жидкости кристаллизуется в соответствии со стабильной диаграммой.

При относительно невысокой скорости охлаждения затвердевание начинается в соответствии со стабильной диаграммой. Но при превышении некоторого критического охлаждения, т. е. ниже линии ЕСF, из остатка жидкой фазы выделяется цементит и аустенит. В итоге, после завершения эвтектического превращения в сплаве имеются следующие фазы: графит первичный, графитная и цементитная эвтектики.

Если сплав охлаждается с очень высокой скоростью, то в интервале ликвидус-солидус наряду с выделением первичного графита происходит кристаллизация и первичного цементита. Следовательно, в структуре такого быстроохлажденного чугуна будут одновременно присутствовать первичные графит и цементит, а также цементитная эвтектика.

Дальнейшие структурные превращения при охлаждении сплавов до комнатной температуры обычно рассматриваются по метастабильной диаграмме. Однако в объемах, окружающих графитные включения, возможно выделение графита вследствие замедления скорости охлаждения отливок и наличия графитизирующих примесей.

Порядок выполнения работы

1. Детально ознакомиться с теоретической частью работы.
2. Исследовать микроструктуру образцов высокоуглеродистых сплавов железа (серого, белого, ковкого и высокопрочного чугуна).

Содержание отчета

1. Описание процессов структурообразования высокоуглеродистых сплавов железа по стабильной и метастабильной диаграммам.
2. Эскизные зарисовки микроструктур изучаемых сплавов.

Лабораторная работа № 2

ПОЛУЧЕНИЕ СЕРОГО ЧУГУНА В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ. ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Цель работы: ознакомиться с особенностями плавки серого чугуна в индукционной печи, формированием его микроструктуры и свойств в зависимости от технологических параметров.

Необходимое оборудование и материалы: индукционная плавильная печь, технологическая оснастка для получения клиновидной пробы на отбел, ступенчатой отливки, цилиндрических образцов, отрезной станок, установка для приготовления шлифов, портативный лазерный спектрометр, твердомер, металлографический микроскоп, доменный чугун, стальной и чугунный лом, ферросплавы кремния и марганца, карбюризатор (науглераживатель), кварцевый песок, жидкое стекло, углекислота.

Общие сведения

В последние годы для плавки чугуна все более широкое применение находят индукционные печи. Основными преимуществами использования индукционной плавки являются следующие: расширение возможности получения высококачественных чугунов, обеспечение точного химического состава, невысокого угара элементов, повышение однородности чугуна благодаря электродинамическому перемешиванию, обеспечение оптимальных условий модифицирования, использование более дешевых шихтовых материалов, улучшение условий труда в плавильных отделениях, уменьшение вредных выбросов в атмосферу.

В современных чугунолитейных цехах чаще всего применяют индукционные тигельные печи промышленной частоты (рис. 2.1).

Высокая производительность печей и эффективное использование электроэнергии достигается при плавке на «болоте», когда после каждого выпуска жидкого металла в печи оставляют 30–40 % расплава и в него загружают соответствующее количество твердой шихты.

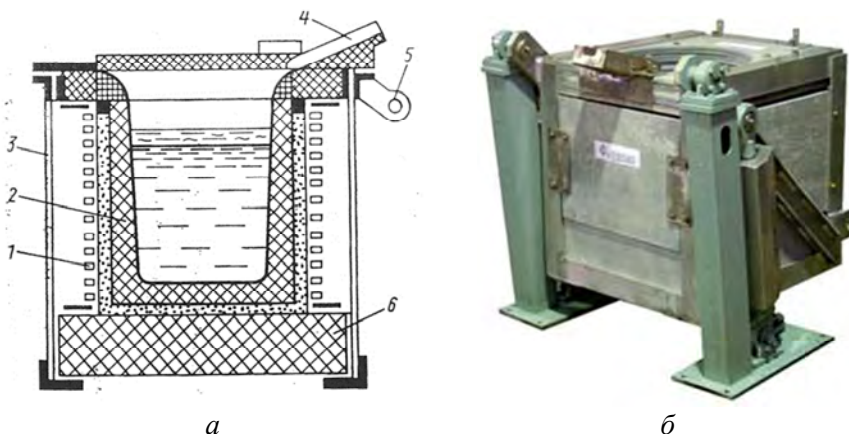


Рис. 2.1. Схема (а) и общий вид (б) лабораторной индукционной тигельной печи:
 1 – водоохлаждаемый индуктор; 2 – тигель; 3 – кожух; 4 – сливной носок;
 5 – кронштейн; 6 – плита

Надежная эксплуатация индукционных печей в значительной степени зависит от стойкости футеровки тигля, которая испытывает термические, химические и механические воздействия. Для изготовления тиглей применяют кислую сухую массу из молотых кварцитов или высококремнезистых песков (более 97 % SiO_2). Для спекания футеровки добавляют 1,5–2,0 % борной кислоты. При этом стойкость тигля для печей вместимостью 6–10 т составляет 250–300 плавок. Для плавки в индукционных печах можно использовать любые шихтовые материалы.

В качестве примера в табл. 2.1 представлен состав шихты на выплавку в индукционной тигельной печи серого чугуна марки СЧ20.

Таблица 2.1

| № п/п | Наименование материала | Марка | Количество в металлозавалке, % |
|-------|--|-------|--------------------------------|
| 1 | Литейный чугун | ЛЗ-Л5 | 15–20 |
| 2 | Чугунный лом | 17А | 60–45 |
| 3 | Стальной лом | 1 А | 10 |
| 4 | Возврат собственного производства (литники, бракованные отливки) | СЧ20 | 25 |
| 5 | Карбюризатор (науглероживатель) | ТУ | По расчету |
| 6 | Ферросилиций | ФС45 | По расчету |

Особенность индукционной плавки заключается в отсутствии контакта металла с теплоносителем, возможности регулирования температуры и выдержки расплава, простоте введения различных добавок. Тем не менее, в тигельных печах имеют место реакции взаимодействия металла с футеровкой, шлаком, атмосферой, что приводит к изменению его химического состава. Прохождение этих реакций интенсифицируется при электромагнитном перемешивании металла. Угар основных элементов чугуна при различном перегреве и выдержке металла в индукционных печах с кислой футеровкой приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Угар (–) и пригар (+) основных элементов при плавке серого чугуна в индукционных печах

| Температура, °С | Угар элементов, % | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | C | | Si | | Mn | | Cr | |
| | 1 час | 3 часа | 1 час | 3 часа | 1 час | 3 часа | 1 час | 3 часа |
| 1350 | –0,08 | –0,45 | – | – | – | –1,73 | –1,8 | –3,64 |
| 1450 | –2,48 | –6,74 | +0,34 | +1,18 | – | –1,82 | –1,34 | –4,45 |
| 1550 | –7,95 | –24,3 | +3,22 | +11,3 | –2 | –5,48 | –4,23 | –8,45 |

Важной технологической операцией при получении синтетического чугуна на базе шихты из стальных отходов является процесс науглероживания. На этот процесс существенно влияют интенсивность перемешивания, температура, качество и состав карбюризатора. Науглероживание сопровождается восстановлением оксидов, находящихся в расплаве, уменьшением угара элементов, содержания газов, износа футеровки. В практике литейного производства наилучшие результаты по степени усвоения в жидком металле (90–95 %) показывают гранулированный графит, электродный порошок.

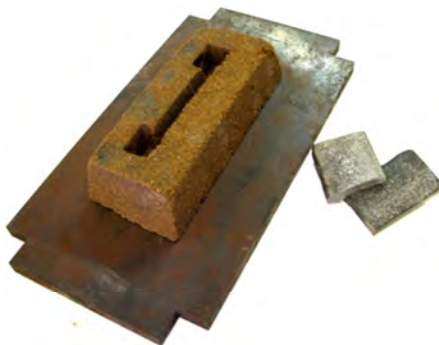


Рис. 2.2. Методика получения клиновой пробы на отбел



a



б

Рис. 2.3. Песчаная (*a*) и металлическая (*б*) формы для получения чугунных образцов



Рис. 2.4. Ступенчатая плита для исследования твердости

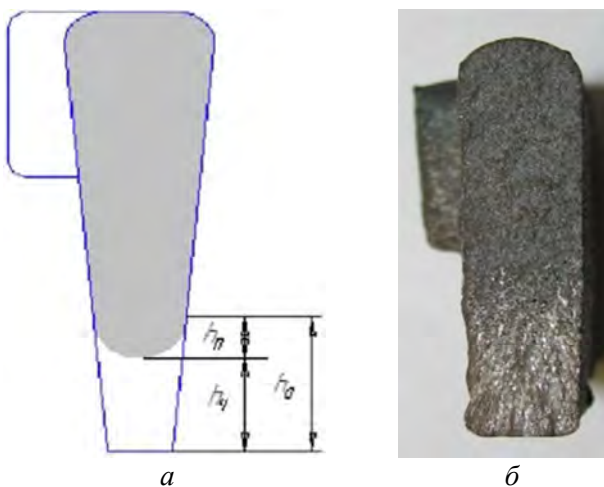


Рис. 2.5. Схема замера (а) глубины отбела чугуна по излому клиновой пробы (б)

Порядок проведения работы

Работа рассчитана на 4 часа.

Изучить оборудование и приборы, необходимые для выполнения работы, инструкции по их эксплуатации, технику безопасности.

Рассчитать шихту для выплавки серого чугуна, подготовить необходимые шихтовые материалы, ферросплавы и карбюризатор.

Подготовить и установить формы для получения технологической пробы на отбел, ступенчатой отливки и цилиндрических образцов (рис. 2.2, 2.3, 2.4).

Выплавить расчетное количество серого чугуна заданного химического состава. Плавку чугуна в индукционных печах выполняют лаборанты, имеющие специальный допуск.

После расплавления шихты выдать из печи в ковш первую порцию металла и залить технологическую пробу на отбел (рис. 2.5, б). Если глубина отбела более 7 мм, это означает, что полученный чугун имеет пониженный углеродный эквивалент и необходимо провести подшихтовку по углероду и кремнию. Для этого ввести необходимое количество карбюризатора и ферросилиция.

Окончательный выпуск жидкого чугуна осуществить в предварительно разогретый ковш, залить формы и получить образцы для

исследования химического состава, макро- и микроструктуры, склонности чугуна к отбелу и твердости.

При необходимости осуществить технологическую операцию графитизирующего модифицирования добавками ФС-75 (0,3 %), либо гранулированным модификатором «МИГ» (0,15 %).

С использованием портативного лазерного спектрометра ЛИС-01 провести анализ состава полученного чугуна и сравнить с расчетным. Обработать полученные результаты и свести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты исследований

| № п/п | Состав серого чугуна | Глубина отбела, мм | | Твердость, НВ | | | | Микроструктура | | | | | | |
|--------|----------------------|--------------------|---------------|----------------------------|----|----|----|-------------------|--------------|------------|-----------|--|--|--|
| | | | | Толщина стенки отливки, мм | | | | | | | | | | |
| | | По ходу плавки | Окончательная | 5 | 15 | 25 | 45 | Металл. основа, % | | Графит | | | | |
| перлит | феррит | | | | | | | форма ПГф | распред. ПГр | размер ПГд | кол-во ПГ | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

Содержание отчета

1. Краткое введение с формулировкой цели и задач при выполнении работы. Исходные данные для проведения работы.
2. Расчет шихты, характеристика шихтовых материалов. Технология плавки модифицирования серого чугуна.
3. Результаты химического анализа, замеров величины отбела и твердости чугуна на ступенчатой плите.
4. Результаты исследования микроструктуры чугуна.
5. Эскизы форм для получения образцов, рисунки микроструктур.
6. Выводы.

Лабораторная работа № 3

ПОЛУЧЕНИЕ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Цель работы: ознакомление с особенностями плавки и внепечной обработки чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ).

Оборудование, инструмент и материалы: индукционная плавильная печь, разовые литейные формы для получения образцов, отрезной станок, установка для приготовления шлифов, портативный лазерный спектрометр, твердомер, металлографический микроскоп, стальной и чугунный лом, сфероидизирующие и графитизирующие модификаторы, карбюризатор (науглераживатель), кварцевый песок, жидкое стекло, углекислота.

Общие сведения

Высокопрочный чугун является перспективным конструкционным материалом. В практике литейного производства широко используются различные способы получения ЧШГ. Это ковшевая обработка расплава металлическим магнием, различными магнийсодержащими лигатурами.

Основными технологическими операциями, обеспечивающими стабильное получение высокопрочного чугуна являются:

1. Процесс десульфурации, позволяющий за счет обработки исходного расплава специальными реагентами снизить концентрацию в исходном чугуне серы.
2. Сфероидизирующая обработка – за счет введения в жидкий расплав чугуна магнийсодержащих модификаторов для формирования в структуре шаровидного графита.
3. Вторичное графитизирующее модифицирование для получения отливок без отбела.

Способы графитизирующей обработки ЧШГ

1. Сэндвич-метод. Это наиболее широко используемый метод в массовом производстве автомобильных отливок из ЧШГ (рис. 3.1). Он предусматривает размещение мелкокускового магнийсодержащего сплава-сфероидизатора в углублении донной части футеровки

ковша, нанесение на всю открытую поверхность сфероидизатора слоя покровного материала (чугунная или стальная стружка, дробь). Ковш заполняется жидким чугуном таким образом, чтобы струя расплава не попадала прямо на лигатуру и покровный материал.

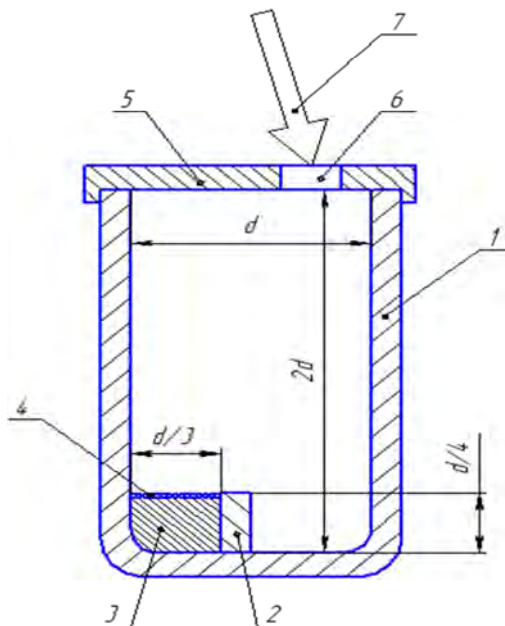


Рис. 3.1. Схема сэндвич-метода:

1 – прогретый ковш; 2 – перегородка; 3 – модификатор; 4 – чугунная дробь;
5 – крышка; 6 – заливочное отверстие; 7 – жидкий чугун

Основные преимущества сэндвич-процесса: простота, низкая себестоимость, технологическая гибкость. Основные недостатки: значительное дымовыделение и свечение, сопровождающие обработку; относительно низкое, иногда нестабильное усвоение магния (обычно 30–40 %); значительное увеличение содержания кремния в чугуне, что ограничивает количество оборотного скрапа ЧШГ, который может быть переплавлен, и содержание кремния в исходном чугуне; значительное снижение температуры чугуна при обработке; необходимость тщательной очистки ковшей от шлака после обработки, для предотвращения попадания шлаковых включений в отливки; невозможность использования высокосернистого ваграночного чугуна.

В последние годы специально для сэндвич-метода созданы бескремнистые сфероидизаторы, что позволяет использовать исходный чугун с более высоким содержанием кремния и тем самым устранить одно из основных ограничений применения этого процесса. Так, в США и Японии успешно апробован бескремнистый магниевый сфероидизатор в виде прессованных округлых таблеток плотностью не ниже $4,6 \text{ г/см}^3$, которые состоят из чистых порошкового железа, магния (обычно 10 %), небольшого количества силикокальция и при необходимости РЗМ.

2. Модифицирование в герметизированных ковшах.

Герметизированные ковши – модифицирующее оборудование средней сложности (рис. 3.2). Метод обработки чугуна металлическим магнием в герметизированных ковшах разработан в ЦНИИТ-маш. Недостатки герметизированных ковшей: сложность ремонта и футеровки; неудобство удаления шлака; трудоемкость и длительность подготовки ковша к следующему циклу обработки (в условиях непрерывного ритма производства ЧШГ это вызывает необходимость наличия нескольких ковшей); большая масса и относительная сложность конструкции. Герметизированные ковши не нашли широкого применения вследствие трудностей их надежной герметизации и сложности эксплуатации.

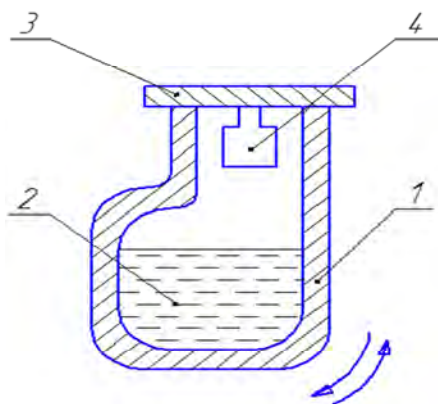


Рис. 3.2. Схема модифицирования в герметизированном ковше:
1 – ковш; 2 – жидкий чугун; 3 – герметизированная крышка;
4 – стакан с магнием

3. Инмолд-процесс. Этот процесс внутриформенной обработки считается крупнейшим достижением в области технологии производства ЧШГ. Процесс предусматривает размещение сфероидизатора внутри литейной формы в специальной реакционной камере, расположенной между стояком и питателем отливки (рис. 3.3).

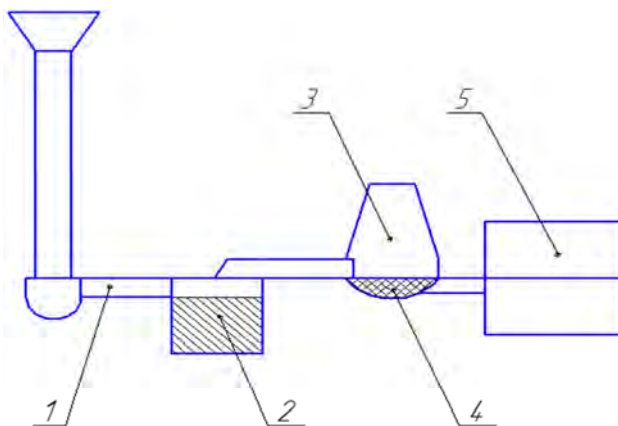


Рис. 3.3. Схема внутриформенного сфероидизирующего модифицирования ЧШГ: 1 – литниковая система; 2 – реакционная камера; 3 – центробежный шлакоуловитель; 4 – фильтровочная сетка; 5 – отливка из ЧШГ

Данный способ эффективен только для низко-сернистого исходного чугуна (не более 0,01 % S) и требует обеспечения равномерной скорости растворения сфероидизатора при заполнении формы расплавом чугуна, предотвращения попадания в отливку нерастворившихся частиц сфероидизатора и продуктов химических реакций сфероидизирующей обработки в виде шлаковых включений.

Растворение сфероидизатора в чугуне протекает вне контакта с воздухом, поэтому при оптимальных условиях, регулируемых с помощью указанного соотношения, инмолд-процесс обеспечивает усвоение магния минимум на 80 %. Следовательно, расход модификатора при этом в 2 раза меньше по сравнению с другими методами. Кроме того, каждая отливка модифицируется в одинаковых условиях, что обеспечивает постоянство структуры и свойств ЧШГ.

Инмолд-процесс имеет следующие преимущества:

– отсутствие дымовыделения и свечения, поскольку все продукты реакции сфероидизации адсорбируются материалом литейной формы;

– сокращение затрат на оборудование, предотвращающее загрязнение окружающей среды.

К недостаткам процесса можно отнести следующее: необходимость специальных сплавов-сфероидизаторов, что ограничивает возможность управления структурой и свойствами ЧШГ за счет состава модификаторов, необходимость усиленного контроля качества каждой отливки с применением неразрушающих методов испытаний, снижение на 2–3 % съема отливок с литейной формы (опоки) вследствие необходимости установки реакционной камеры в литниковой системе; необходимость низкосернистого исходного чугуна, опасность загрязнения определенных типов отливок неметаллическими включениями.

Таким образом, из всего разнообразия основных способов обработки ЧШГ наиболее приемлемым для литейных цехов отечественных машиностроительных предприятий является ковшевое модифицирование (сэндвич-метод).

В качестве примера на рис. 3.4 представлены фотографии микроструктуры включений графита исходного серого и высокопрочных чугунов, полученных ковшевым способом с использованием быстроохлажденного гранулированного модификатора, содержащего 5,5 % магния.

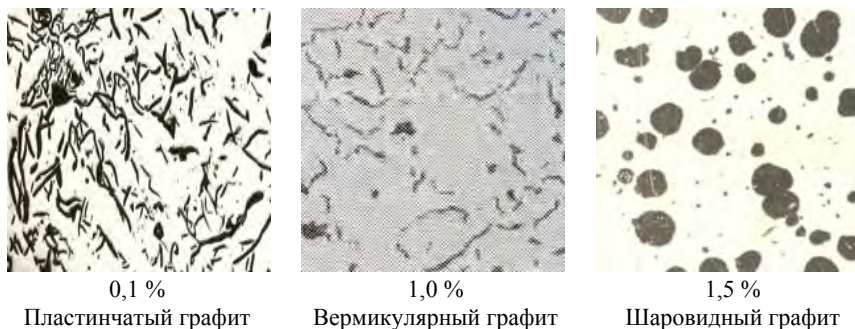


Рис. 3.4. Влияние добавок модификатора на форму графитных включений

Составы лигатур для сфероидизирующей обработки чугуна

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что подавляющее количество отливок из легированных сплавов производится лигатурным способом. Например, растворение магния в другом металле или сплаве позволяет получать модификаторы (лигатуры), более полно усваиваемые жидким чугуном. При лигатурном процессе значительно увеличивается коэффициент усвоения магния, что, в свою очередь, существенно стабилизирует процесс образования шаровидного графита. Компоненты, входящие в состав лигатур по функциональному назначению, можно разделить на сфероидизаторы и дополнительные рафинирующие, регуляторы интенсивности протекания модифицирующей реакции, графитизаторы, легирующие и наполнители. Основное требование к наполнителям – это высокая растворимость в них основного элемента сфероидизатора. Чаще всего в качестве такого наполнителя используют сплавы железа с кремнием (легкие лигатуры) или никель, медь либо их сочетание (тяжелые лигатуры).

Никельмагниевого лигатуры отличаются высокой технологичностью, быстро реагируют с расплавом, образуют небольшое количество шлака. Однако высокая стоимость и дефицитность никеля существенно сдерживает их применение. Кроме того применение лигатур на никелевой основе требует дополнительного графитизирующего модифицирования. Более перспективными лигатурами для массового производства высокопрочного чугуна являются легкие лигатуры на железо-кремниевой основе, в состав которых помимо магния – основного элемента сфероидизатора – входят кремний, РЗМ, кальций, цирконий, барий и др. Формирование шаровидного графита в чугуне в промышленных условиях в основном осуществляют малыми добавками магния или магния совместно с РЗМ. Остаточное содержание магния в ЧШГ преимущественно 0,03–0,06 % и зависит от количества серы, кислорода и сфероидизирующих примесей в исходном чугуне. Магнийсодержащие лигатуры используются при получении около половины мирового производства ЧШГ, при этом применяется множество разнообразных составов (табл. 3.1).

Модификаторы ФСМг9 и ФСМг7 рекомендуются для ковшевой обработки ЧШГ, а ФСМг5 можно использовать как для ковшевой, так и внутрiformенной обработки чугуна. Более низкие по содер-

жанию магния модификаторы целесообразно применять при производстве отливок и ЧВГ, а также для графитизирующего модифицирования серого чугуна.

Таблица 3.1

Составы «легких» лигатур типа ФСМг

| Марка | Содержание элементов, % | | | | | Область применения |
|-------|-------------------------|---------|---------|-------|------------------|--|
| | Mg | Ca | PЗМ | Si | примеси не более | |
| ФСМг9 | 8,5–10,5 | 0,2–1,0 | 0,3–1,0 | 50–60 | 1,2 | Ковшовая обработка на ВЧ |
| ФСМг7 | 6,5–8,5 | 0,2–1,0 | 0,3–1,0 | 45–55 | 1,2 | Внутриформенная и ковшовая обработка на ВЧ |
| ФСМг5 | 4,5–6,5 | 0,2–1,0 | 0,3–1,0 | 45–55 | 1,2 | |
| ФСМг4 | 3,5–4,5 | 0,2–1,0 | 1,0–2,0 | 55–70 | 2,5 | |

Для получения более высоких марок ЧШГ в практике производства используются «тяжелые» магнийсодержащие лигатуры на основе меди и никеля составы таких лигатур представлены в табл. 3.2–3.3.

Таблица 3.2

Составы «тяжелых» никелевых лигатур

| № п/п | Ni | Mg | PЗМ | Fe | Cu | C | Mn |
|-------|-------|-------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1 | 82–84 | 14–17 | 0,4–0,6 | макс. 1,0 | макс. 0,4 | 0,5 | макс. 0,04 |
| 2 | 62–65 | 14–17 | 0,4–0,6 | 18–22 | макс. 1,0 | макс. 0,4 | макс. 0,1 |
| 3 | 52–56 | 14–7 | 0,4–0,6 | 18–22 | 8–12 | макс. 1,0 | макс. 0,1 |

Таблица 3.3

Составы «тяжелых» медных лигатур

| № п/п | Cu | Mg | Si | Fe | Ni | Pb | Sn |
|-------|-------|-------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| 1 | 89–91 | 9–11 | макс. 0,05 | макс. 0,1 | макс. 0,05 | макс. 0,05 | макс. 0,05 |
| 2 | 84–86 | 14–16 | макс. 0,1 | макс. 0,1 | макс. 0,05 | макс. 0,05 | макс. 0,05 |
| 3 | 78–82 | 18–22 | макс. 0,15 | макс. 0,1 | макс. 0,05 | макс. 0,05 | макс. 0,05 |

Порядок проведения работы

Работа рассчитана на 4 часа.

1. Ознакомиться с оборудованием, приборами, оснасткой, необходимыми для выполнения работы. Изучить инструкции по эксплуатации оборудования и технике безопасности.

2. Подготовить необходимые шихтовые материалы и модификаторы.

3. Произвести расчет шихты на получение высокопрочного чугуна заданного состава.

4. Подготовить литейные формы для получения образцов чугуна.

5. Выплавить исходный чугун заданного состава, перегреть его до требуемой температуры и провести сфероидизирующее ковшовое модифицирование.

6. Залить формы в соответствии с индивидуальным заданием и получить образцы.

7. Измерить глубину отбела по клиновой пробе. Провести анализ химического состава полученного чугуна и твердости.

8. Подготовить шлифы и провести исследования микроструктуры полученного высокопрочного чугуна.

9. Результаты опытов свести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

| № п/п | Состав исходного чугуна | Сфероидизирующая лигатура | | Глубина отбела, мм | Твердость, НВ | Микроструктура | | | | | | |
|-------|-------------------------|---------------------------|---------------|--------------------|---------------|-------------------------|--------|-----------|-------------|-------------------|------------------|--|
| | | Марка | Количество, % | | | Металлическая основа, % | | Графит | | | | |
| | | | | | | перлит | феррит | форма ШГф | диаметр ШГд | распределение ШГр | количество ШГ, % | |
| | | | | | | | | | | | | |

Содержание отчета

1. Краткое введение с формулировкой цели и задач, поставленных при выполнении работы. Исходные данные для проведения работы.
2. Расчет шихты на получение ЧШГ заданной марки, характеристика шихтовых материалов, модификаторов.
3. Таблицы, графики, эскизы форм, проб, образцов, фотографии структуры до и после модифицирования.
4. Представить в виде таблицы результаты исследований химического состава полученного высокопрочного чугуна, глубины отбела, твердости и микроструктуры, сделать выводы.
5. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 4

ПОЛУЧЕНИЕ КОВКОГО ЧУГУНА

Цель работы: ознакомиться с особенностями плавки белого чугуна, формирования структуры ковкого чугуна в процессе высокотемпературного отжига.

Оборудование, инструмент, материалы: индукционная плавильная печь, разовые литейные формы для получения образцов, муфельная печь для высокотемпературного отжига чугуна, отрезной станок, установка для приготовления шлифов, портативный лазерный спектрометр, твердомер, металлографический микроскоп, стальной и чугунный лом.

Общие сведения

При производстве отливок из ковкого чугуна в формы заливается сплав с низким углеродным эквивалентом (углерод – 2,4–2,9 %, кремний – 1,0–1,6 %). Склонность такого сплава к графитизации при эвтектическом превращении подавляется, и высокоуглеродистая фаза кристаллизуется в виде цементита. При дальнейшем охлаждении такого чугуна все превращения происходят также с образованием цементита, т. е. по диаграмме метастабильного равновесия.

Ковкий чугун получают графитизирующим отжигом исходного белого чугуна, при этом используют три стадии термообработки.

Рассмотрим структурные изменения в доэвтектическом чугуने в процессе термической обработки (рис. 4.1).

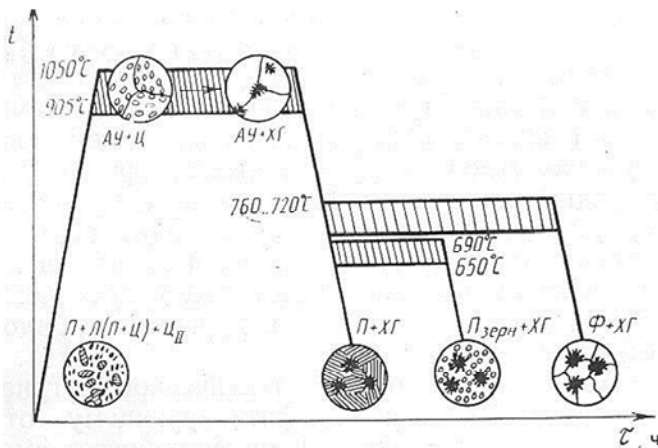
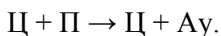


Рис. 4.1. Режимы отжига белого чугуна на ковкий

Отливки из белого чугуна при комнатной температуре имеют в структуре цементитную эвтектику (ледебурит) и перлит. При некотором перегреве чугуна выше линии эвтектоидного превращения феррит пересыщается углеродом за счет перлито-цементитной эвтектики, что приводит к аустенизации сплава.



Дальнейший рост углерода в аустените при повышении температуры осуществляется за счет растворения вторичного цементита. Первая стадия отжига белого чугуна производится при температуре 950–1050 °С и в начале процесса микроструктура состоит из цементита и аустенита.

Графитизация белого чугуна представляет типичный диффузионный процесс, в течение которого идет непрерывное увеличение графитной фазы за счет распада цементита. Первая стадия отжига завершается после полного исчезновения цементита. Микроструктура чугуна при этом состоит из аустенита и графита компактной (хлопьевидной) формы.

При дальнейшем охлаждении чугуна происходит эвтектоидное превращение и в структуре формируется металлическая основа в виде перлита и хлопьевидного графита. Такой чугун называют перлитным ковким чугуном. Он обладает высокой прочностью, твердостью и незначительным относительным удлинением.

С целью повышения пластинчатости ковкого чугуна производится вторая стадия отжига по двум вариантам:

1^й – непродолжительный отжиг (650–690 °С). При этом эвтектоидный цементит сфероидизируется без распада (обеспечивается в таком КЧ высокая прочность и пластичность). Структура – хлопьевидный графит отжига в зернистом перлите.

2^й – проводят, если нужно получить структуру с высокой пластичностью. Чугун после первой (высокотемпературной стадии) охлаждают до температуры 750–720 °С отжигают на феррит в течение длительного времени до полного распада эвтектоидного цементита. Такой чугун называют ферритный ковкий чугун. В табл. 4.1 приведены составы некоторых марок ковкого чугуна.

Таблица 4.1

| Марка ковкого чугуна | Способ плавки | НВ | Химический состав, % | | | | | |
|----------------------|---------------|---------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | С | Si | Mn | P | S | Cr |
| Ферритного класса | | | | | | | | |
| КЧ30-6 | вагранка | 100–163 | 2,6–2,9 | 1,0–1,6 | 0,4–0,6 | до 0,18 | до 0,2 | до 0,08 |
| КЧ37-12 | эл. печь | 110–163 | 2,4–2,7 | 1,2–1,4 | 0,2–0,4 | до 0,12 | до 0,06 | до 0,06 |
| Перлитного класса | | | | | | | | |
| КЧ50-5 | вагранка/ | 170–230 | 2,5–2,8 | 1,1–1,3 | 0,3–1,0 | до 0,1 | до 0,2 | до 0,08 |
| КЧ70-2 | эл. печь | 241–285 | 2,4–2,7 | 1,2–1,4 | 0,3–1,0 | до 0,1 | до 0,2 | до 0,08 |

Порядок выполнения работы

Работа рассчитана на 4 часа.

1. Изучить оборудование и приборы, необходимые для выполнения работы, инструкции по их эксплуатации, технику безопасности.
2. Рассчитать шихту для выплавки исходного белого чугуна, подготовить необходимые шихтовые материалы.
3. Подготовить литейные формы для получения образцов.

4. Выплавить заданное количество белого чугуна следующего химического состава: С – 2,5–2,7 %; Si – 1,2–1,6 %; Mn – 0,4–0,8 %. Плавку чугуна выполняют лаборанты, имеющие специальный допуск.

5. Отлить образцы и провести графитизирующий отжиг по режимам указанным преподавателем..

6. Исследовать химический состав, микроструктуру и твердость чугуна. Полученные результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты исследований

| № п/п | Наименование сплава | Режим термообработки | | | | Твердость НВ | Микроструктура | | | |
|-------|---------------------|----------------------|--------|----------|--------|--------------|----------------|--------|-----------|----------|
| | | 1 стадия | | 2 стадия | | | Металл. основа | Графит | | |
| | | T, °C | τ, час | T, °C | ε, час | | | форма | рас-пред. | раз-меры |
| | | | | | | | | | | |

Содержание отчета

1. Краткое введение с формулировкой цели и задач при выполнении работы. Исходные данные для проведения работы.

2. Расчет шихты, характеристика шихтовых материалов. Технология плавки белого чугуна.

3. Режимы отжига белого чугуна на ковкий.

4. Таблицы.

5. Эскизы форм для получения образцов, рисунки микроструктур чугуна до и после отжига.

6. Выводы.

Лабораторная работа № 5

ГРАФИТИЗИРУЮЩЕЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ СЕРОГО ЧУГУНА

Цель работы: ознакомиться с особенностями процесса графитизирующего модифицирования серого чугуна.

Оборудование, инструмент и материалы: индукционная плавильная печь, стержневые формы для получения образцов, отрезной станок, металлографический микроскоп, пресс Бринелля, шихтовые материалы для выплавки чугуна, графитизирующие модификаторы.

Общие сведения

Чугун является самым распространенным конструкционным материалом. Он обладает хорошими литейными, прочностными, антифрикционными свойствами, высокой износостойкостью, удовлетворительной обрабатываемостью. В значительной степени это связано с наличием в сплаве графитных включений.

Одним из распространенных методов воздействия на процесс графитизации чугунов является модифицирование жидкого металла. Используются для этих целей графитизирующие и стабилизирующие присадки.

К графитизирующим модификаторам относится ферросилиций, силикокальций, лигатура ФСЗОРЗМЗ0, комплексный модификатор на основе алюминия с активными добавками (РЗМ, Са, Mg, Ва).

Стабилизирующие модификаторы обычно содержат марганец, хром, медь, никель, олово, сурьму и др. Их использование способствует формированию перлитной структуры, снижению количества и размеров графитных включений, что обеспечивает повышение механических и эксплуатационных свойств чугуна.

Модифицирование серого чугуна графитизирующими добавками за счет создания дополнительных центров снижает размеры графита, способствует кристаллизации отливок по стабильной диаграмме, без цементита. Наличие в отливках отбеленной структуры, особенно в тонкостенных сечениях, приводит к резкому ухудшению обрабатываемости чугуна.

Модифицирование особенно эффективно для доэвтектических чугунов при высоком перегреве расплава, использовании большого количества стального лома в шихте и повышенных скоростях охлаждения отливок (кокильное литье). На эффективность графитизирующей обработки влияет природа используемых шихтовых материалов, химический состав исходного чугуна, температура перегрева металла, тип, количество и фракционный состав модификатора, способ его ввода в жидкий металл, вид литейной формы и другие факторы.

Например, снижение содержания в исходном чугуне углерода и кремния повышает эффективность модифицирования.

Наиболее распространенные модификаторы серого чугуна – это ферросилиций ФС75 (74–80 % Si, 1,5 % Al), содержащий в своем составе такие активные добавки, как магний, барий, РЗМ и др.

Достаточно эффективен для кокильного литья комплексный гранулированный на основе алюминия, содержащий 8–15 % РЗМ, 2–3 % магния, до 10 % кремния, до 12 % железа. Модифицирование серого чугуна можно осуществлять в ковше под струей жидкого металла, а так же в литейной форме.

Многие модификаторы подвергают дроблению и рассеву на фракции размером от 2 до 15 мм. Например, комплексный модификатор «МИГ», разработанный на кафедре «Металлургия черных и цветных сплавов», используется как в виде гранул, полученных на специальной установке, так и в виде компактных вставок для внутрiformенного графитизирующего модифицирования.

Количество вводимого модификатора зависит от химического состава чугуна, толщины стенки отливки, материала формы. В качестве примера на рис. 5.1 представлена зависимость глубины отбела серого чугуна от величины добавки графитизирующего модификатора «МИГ». Обработку жидкого чугуна обычно проводят при температуре 1350–1420 °С. Важную роль на эффективность модифицирования играет выдержка чугуна перед заливкой форм. При недостаточной выдержке модификатор не успевает равномерно раствориться по всему объему, и наоборот, при длительной выдержке расплава эффект снижается за счет растворения зародышей, образованных модификатором.

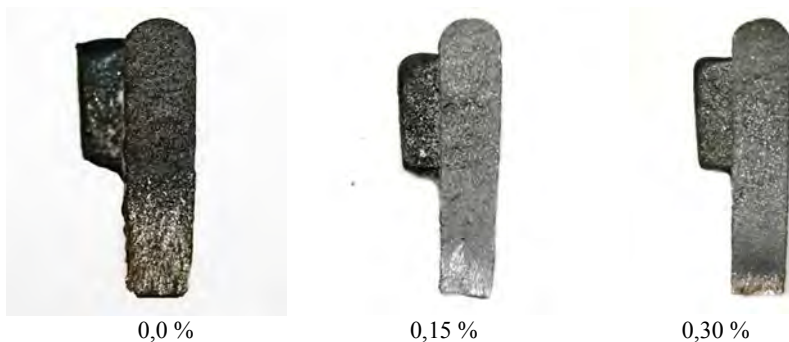


Рис. 5.1. Влияние величины добавки модификатора на изменение глубины отбела серого чугуна

Порядок выполнения работы

Работа рассчитана на 4 часа.

1. Ознакомиться с оборудованием, приборами, оснасткой необходимыми для выполнения работы.

2. Произвести расчет шихты для выплавки исходного серого чугуна, подготовить необходимые шихтовые материалы и модификаторы.

3. Изготовить стержневые формы для заливки цилиндрических образцов и проб на отбел в соответствии с индивидуальным заданием.

4. Выплавить исходный серый чугун, перегреть его до заданной температуры и залить в формы первую порцию немодифицированного сплава.

5. Осуществить модифицирование чугуна заданным количеством модификатора и залить цилиндрические образцы и клиновые пробы на отбел.

6. После охлаждения полученных образцов очистить их от остатков формовочной смеси разрушить клиновые пробы, измерить глубину зоны чистого отбела h_1 , переходной зоны h_2 и определить общий отбел h (см. рис. 2.5).

7. Из цилиндрической отливки отрезать образцы для исследований твердости и микроструктуры.

8. Измерить твердость образцов исходного и модифицированного чугуна на прессе Бринелля.

9. Приготовить шлифы и провести на микроскопе исследования структуры чугуна. По ГОСТ 3443-77 оценить количество графита, форму, размеры и характер распределения и на травленных шлифах (4 % спиртовой раствор азотной кислоты) изучить соотношение перлита и феррита. Сфотографировать (зарисовать) структуру.

Обобщить полученные результаты и свести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты исследований

| № п/п | Состав чугуна | Углеродный эквивалент СЕ, % | Модификатор | | Глубина отбела, мм | | | Твердость НВ | Графит | | | | Перлит | | |
|-------|---------------|-----------------------------|-------------|-----------|--------------------|-----------------------|-------------------|--------------|-----------|-------|-------------|---------------|------------|-------------------|--|
| | | | Тип | Кол-во, % | Чистая зона | Переходная зона h_1 | Общий $h_1 + h_2$ | | Кол-во, % | Форма | Размер, мкм | Распределение | Количество | Дисперсность, мкм | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

Содержание отчета

1. Теоретическая часть с описанием технологии плавки и модифицирования серого чугуна.
2. Исходные шихтовые материалы, типы и составы графитизирующих модификаторов.
3. Расчет шихты на выплавку в индукционной печи серого чугуна заданного состава.
4. Описание результатов экспериментов (табл. 5.1).
5. Эскизы форм, проб образцов, фотографии микроструктур до и после модифицирования.
6. Выводы по работе.

РАЗДЕЛ 2

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ

Цель работы: изучение формирования микроструктуры углеродистых сталей в литом и равновесном состоянии.

Необходимое оборудование и материалы: металлографический микроскоп, комплект образцов литых и отожженных углеродистых сталей с разным содержанием углерода.

Общие сведения

К сталям относятся сплавы железа с углеродом, если концентрация последнего не превышает 2,14 % С (по диаграмме Fe₃C, рис. 1.1).

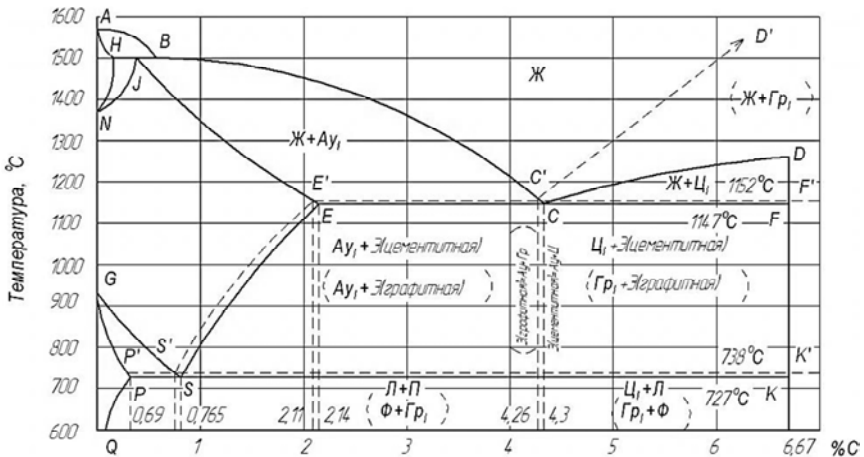


Рис. 1.1. Диаграмма «железо-углерод»

Кроме углерода, сталь имеет целый ряд примесей Mn, Si, S, P, O, N, H и др., которые вызывают соответствующее воздействие на ее свойства. Присутствие таких примесей обусловлено тем, что от некоторых из них невозможно избавиться в процессе плавки (P, S), а также переходом их в сталь в процессе раскисления (Mn, Si) или из шихты – легированного металлолома – ферросплавов (Cr, Ni и др. легирующих элементов).

В сплавах Fe-C с содержанием углерода до 2,14 % выделение графита в процессе кристаллизации маловероятно. Поэтому фазовое состояние стали описывается диаграммой метастабильного равновесия системы Fe-Fe₃C. В данной системе возможна жидкая фаза (Ж), которая представляет собой жидкий раствор железа с углеродом, и четыре твердые – феррит, – аустенит, – феррит и цементит.

Характерным точкам диаграммы состояния Fe-Fe₃C соответствуют следующие концентрации углерода (% по массе) (рис. 1.1):

В – 0,5 % С (в жидкой фазе, которая находится в равновесии с ферритом и аустенитом при перетектической температуре 1499 °С).

Н – 0,1 % С (граничное содержание в феррите при 1499 °С).

j – 0,18 % С (в аустените при перетектической температуре 1499 °С)
Е – 2,14 % (граничное содержание в аустените при температуре 1147 °С).

S – 0,80 % С (в аустените при эвтектоидной температуре 727 °С).

P – 0,02 % С (граничное содержание в феррите при эвтектоидной температуре 727 °С).

Диаграмма Fe-Fe₃C показывает структуры углеродистых сталей и превращения в равновесном состоянии.

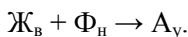
Увеличение скорости охлаждения и степени переохлаждения аустенита приводят к созданию неравновесных структур.

Кристаллизация и структурные изменения в стали в равновесных условиях

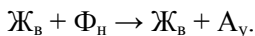
Рассмотрим кристаллизацию, фазовые и структурные изменения в сплавах Fe-C, которые содержат разное количество углерода.

В сплавах с концентрацией углерода до 0,51 % после того, как будет достигнута температура, которая соответствует линии АВ (рис. 1.1) (ликвидус), из жидкой фазы начинают выделяться кристаллы δ-феррита, сплав становится двухфазным (жидкий сплав и крист-

таллы δ -феррита). Кристаллизация сплавов (до 0,1 % С) с формированием феррита заканчивается при температурах, что соответствует линии АН. В сплавах, которые содержат 0,1–0,16 % С, после того, как температура станет 1499 °С (НJB – линия перетектического невариантного равновесия), в равновесии находятся – δ -феррит состава т. Н (0,1 % С) и жидкая фаза состава н. В (0,5 % С). При этой температуре начинается перетектическое превращение $Ж_в + \Phi_н \rightarrow \Phi_н + A_у$, в результате которого возникает двухфазная структура δ -феррит (Φ) + + твердый раствор ($A_у$). При концентрации в стали углерода 0,16 % и температуре 1499° (т. J) получаемые кристаллы твердого раствора δ -феррита в результате взаимодействия с жидкой фазой при перетектической реакции полностью превращаются в аустенит.



В интервале концентраций 0,16–0,51 % С при перетектической температуре в результате взаимодействия между δ -ферритом и жидкой фазой также создается аустенит, но жидкая фаза остается, правда, в меньшем объеме:



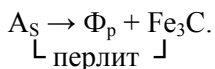
В связи с этим при температуре ниже линии JB, сплав будет двухфазным аустенит + жидкость.

Сплавы с содержанием от 0,51 % до 2,14 % С кристаллизуются в интервале температур, ограниченными линиями BC и JE (рис. 1.1). Ниже линии BC сплавы находятся в жидкой фазе и аустените. В процессе кристаллизации состав жидкой фазы меняется по линии солидус (JE), и сплавы превращаются в однофазную структуру – аустенит.

Первичные кристаллы δ -феррита и аустенита имеют вид дендритов, величина и строение которых определяются перегревом металла выше линии ликвидус, его составом и условиями охлаждения в процессе кристаллизации.

Полиморфные превращения в железе и изменение растворимости углерода в аустените и феррите с понижением температуры вызывают фазовые и структурные превращения.

Эти превращения, которые происходят в твердом состоянии, описываются линиями диаграммы Fe-Fe₃C. Линии NH и NJ являются соответственно верхней и нижней границей области зарождения δ-феррита и аустенита. При охлаждении они соответствуют температурам начала и конца полиморфного превращения δ-феррита в аустенит. Однофазная аустенитная структура сталей сохраняется до температур, которые соответствуют линиям GS и ES. Ниже линии GS в сплавах с содержанием углерода 0,8 % C начинается γ → α-превращение с зарождением парамагнитного и ферромагнитного феррита. Линия SE характеризует граничную растворимость углерода в аустените и при охлаждении соответствует температуре начала выделения в аустените вторичного цементита. Принятые температуры, которые соответствуют линиям GS и SE на условиях равновесия, обозначают A₃ и A_{ст}. Линия SP при охлаждении соответствует температурам конца превращения аустенита в феррит. Линия PSK при охлаждении соответствует распаду аустенита (0,8 % C) с созданием эвтектоида (ферритно-цементитной структуры – перлита).



Критические температуры, которые соответствуют линии РК при охлаждении, обозначаются A_{г1}, при нагреве – A_{с1}.

Изменение растворимости углерода в феррите в зависимости от температуры описывается линией PQ (рис. 1.1). При охлаждении в условиях равновесия эта линия соответствует температурам начала выделения третичного цементита.

Сплавы с содержанием менее 0,02 % C (точка P) называют техническим железом. Эти сплавы выдерживают при охлаждении и нагреве полиморфные γ → α-превращения между линиями GS и SP. Превращение γ → α в этом интервале температур начинается с возникновения зародышей феррита на границах аустенитных зерен, которые растут в виде новых зерен, поглощающих аустенит. Ниже линии GP существует только феррит, из которого после достижения температур, соответствующих линии PQ, выделяется цементит (третичный). Выделение третичного цементита на границах зерен резко снижает пластичность феррита.

Стали с содержанием от 0,02 до 0,8 % С называют доэвтектоидными. Эти стали после кристаллизации состоят из аустенита, который не меняется при охлаждении даже до температур, соответствующих GS. Ниже этой линии на границах зерен аустенита создаются зародыши феррита, из которых растут зерна. Количество аустенита изменяется, а наличие в нем углерода возрастает. Состав аустенита изменяется по линии GS, а феррита – по GP. Чем выше концентрация углерода в стали, тем меньше создается феррита. При достижении 727 °С (А), количество углерода в аустените составляет 0,8 % (пункт S).

Эвтектоидные превращения аустенита проходят при постоянной температуре 727 °С в условиях равновесия трех фаз феррита (0,02 % С), цементита (6,67 % С) и аустенита (0,7 % С). После окончательного охлаждения доэвтектоидные стали имеют структуру феррит + перлит (рис. 1.2).

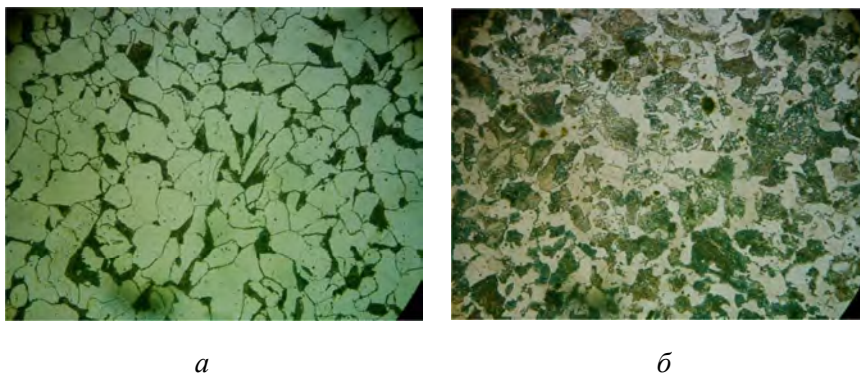


Рис. 1.2. Структура доэвтектоидной стали 20Л (а) и 45Л (б)

Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем меньше в структуре феррита и больше перлита. При содержании 0,6–0,7 % С феррит выделяется в виде обрамления вокруг зерен перлита (рис. 1.3).

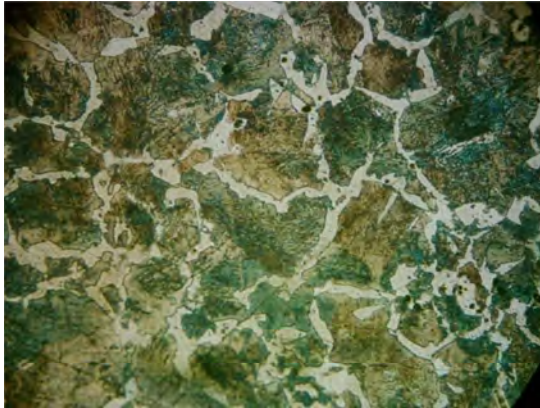


Рис. 1.3 Структура доэвтектоидной стали 65Л

Сталь, которая содержит 0,8 % С называют эвтектоидной. В этой стали, когда температура достигает 727 °С, весь аустенит превращается в перлит (рис. 1.4, *а, б*).

Перлит, как правило, имеет пластинчатое строение, складывается из пластинок феррита и цементита, которые чередуются (рис. 1.4, *а*). После специальной обработки перлит может иметь зернистое строение (рис. 1.4, *б*).



а



б

Рис. 1.4. Структура эвтектоидной стали У8:
а – пластинчатый перлит; *б* – зернистый перлит

Сталь, которая содержит от 0,8 до 2,14 % С, называют заэвтектоидной. Выше линии SE сплав имеет аустенитную структуру. При

температурах, которые соответствуют линии SE, аустенит оказывается насыщенным углеродом и при понижении температуры из него выделяется вторичный цементит. В связи с этим при температуре ниже линии SE структура сплава складывается из аустенита и цементита вторичного, по мере выделения которого концентрация углерода в аустените смещается по линии SE.

При понижении температуры до ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) аустенит, в котором $0,8\text{ \% C}$ (т. S), превращается в перлит. После полного охлаждения заэвтектоидные стали состоят из перлита и вторичного цементита, который выделяется в виде сетки на границах предыдущего зерна аустенита (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Структура заэвтектоидной стали У12

Количество вторичного цементита возрастает с увеличением содержания в стали углерода.

Выделение вторичного цементита в виде сетки или иголок делает сталь хрупкой. Поэтому специальной термообработкой ему придают зернистую форму, обеспечивают его распад с созданием перлита в виде шара.

По структуре стали, которая находится в равновесном состоянии, можно определить наличие в ней углерода. В литом состоянии сталь имеет неравновесную структуру. Для нее характерна крупнозернистое строение, игольчатая форма и неравномерное распределение структурных составляющих (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Видманштетовая структура литой доэвтектоидной стали

В доэвтектоидной литой стали феррит имеет сетчатое или внутрикристаллическое строение в виде видманштетовой структуры. В этом случае выделения феррита имеют форму иголок, размещенных в виде зерен по кристаллографическим осям. Видманштетовая структура получается обычно при содержании от 0,1 % до 0,4–0,5 % С в охлажденных массивных отливках на воздухе.

Выбивка отливок из формы непосредственно после заливки придает им после охлаждения на воздухе еще большую скорость охлаждения, чем в форме, а это оказывает свое влияние на микроструктуру литой стали. С увеличением скорости охлаждения отливки (на воздухе вместо формы) уменьшается количество феррита при любом соответствующем содержании углерода.

Порядок выполнения работы

1. Детальное ознакомление с теоретической частью работы.
2. Исследование микроструктуры образцов литой и отожженной стали с разным содержанием углерода.

Содержание отчета

1. Описание процессов структурообразования в сталях по диаграмме состояния Fe-Fe₃C.
2. Эскизные зарисовки микроструктуры исследованных сталей.
3. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 2

ТЕРМООБРАБОТКА ОТЛИВОК ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы: изучить влияние режимов термообработки на структуру и характеристики среднеуглеродистой стали.

Необходимое оборудование, инструмент и материалы: образцы из стали 25Л–40Л, муфельная электропечь, установка подготовки шлифов, реактивы и приспособления для травления, металлографический микроскоп, маятниковый копер, твердомер.

Общие сведения

Сталь в литом состоянии имеет неравновесную структуру, которая характеризуется крупнозернистым строением, игольчатой формой и неравномерным размещением структурных составляющих. Для среднеуглеродистой стали характерна видманштетова структура, которая состоит из крупных блоков или иголок феррита и перлита. Степень развития видманштетовой структуры зависит от толщины стенки отливки, условий охлаждения. На рис. 2.1 показана разновидность такой структуры, которая встречается в фасонном стальном литье. В тонких сечениях структура может не иметь явно выраженного видманштетового строения, однако зерно остается крупным.

Сталь с крупнозернистой видманштетовой структурой имеет низкие показатели механических свойств, особенно пластичности и ударной вязкости. Поэтому термообработка является одной из обязательных операций в общем технологическом процессе производства стального литья. Ее предназначение – улучшение физико-механических свойств за счет изменения структуры путем нагрева до нужной температуры, выдержки и затем охлаждения с заданной скоростью.

Как правило, термообработка ведется в литейном цехе, при котором есть термическое отделение или участок с печью для отжига, нормализации, закалки и отпуска. В качестве примера на рис. 2.2 приведена микроструктура литой стали 45Л после отжига.

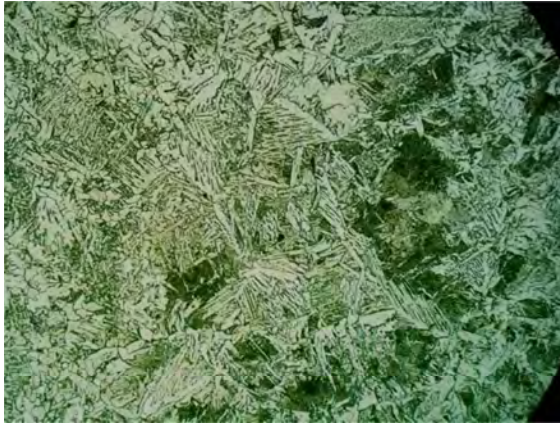


Рис. 2.1. Виндманштатовая структура литой стали 45Л:
светлые иголки – феррит; темное поле – перлит

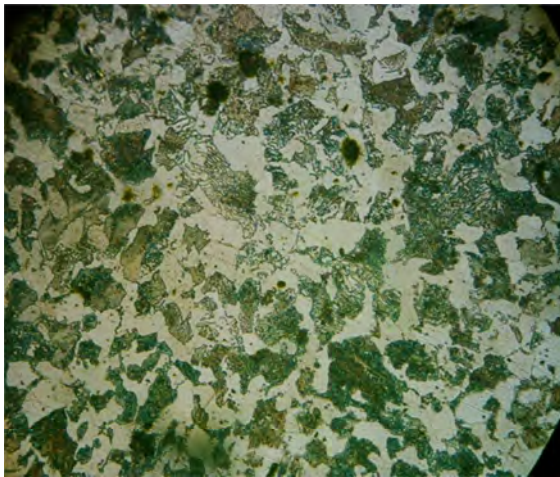


Рис. 2.2. Структура литой стали 45Л после отжига
(светлые округлые участки – феррит, темное поле – перлит)

Режим термообработки характеризуется следующими основными параметрами: скоростью нагрева (V_n), температурой нагрева (t_n) продолжительностью выдержки (τ_b) и скоростью охлаждения (V_o).

Скорость нагрева. Отливки перед термообработкой имеют внутренние напряжения, при этом в тонких частях – напряжения сжатия, в толстых – напряжения растяжения. При ускоренном нагреве в результате разницы температур между тонкими и толстыми частями в отливке возникают дополнительные напряжения такого же знака и складываются с напряжениями при термообработке. Когда суммарные напряжения превысят границу прочности, могут образоваться трещины. Значит, большая скорость нагрева недопустима. При ее выборе нужно учитывать следующие факторы.

1. Механические свойства стали на выходе. Пластичный материал можно нагревать быстрее, малопластичный более медленно.

2. Размеры отливок и равномерность нагрева. Чем более равномерный нагрев и меньшие размеры отливки, тем большая допустимая скорость нагрева, потому что при этом изменяется перепад температур между наружными и внутренними слоями металла.

3. Теплопроводность стали. При высокой теплопроводности изменяется разность температур по сечению отливки и может быть более высокая скорость нагрева.

Вначале трудно учесть количественные факторы, которые воздействуют на скорость нагрева, и поэтому можно принять ориентировочно в пределах 60–100 °С в час. Отливки особо сложной конфигурации желательно загружать в холодную печь и нагревать вместе с печью с назначенной скоростью. Большое значение для равномерности прогрева имеет рациональное размещение отливок в печи с учетом распределения температур по разным ее зонам.

Температура нагрева. При нагреве стали несколько выше точки A_1 (рис. 2.3) весь перлит превращается в аустенит. Для перехода в твердый раствор феррита нужно нагреть сталь выше линии температур A_3 .

Создание аустенита сопровождается двумя процессами: перестройкой решетки ОЦК в ГЦК и растворением углерода в аустените. Первоначальное зарождение аустенита происходит при его участии при температуре A_{c1} , участки аустенита растут до тех пор, пока выше пункта A_{c3} , полностью не пропадет феррит. Таким образом, для завершения превращения в стали при перекристаллизации нужно нагреть ее выше температуры критического пункта A_{c3} на 30–50 °С и выдержать при этой температуре достаточное время.

Содержание углерода, %

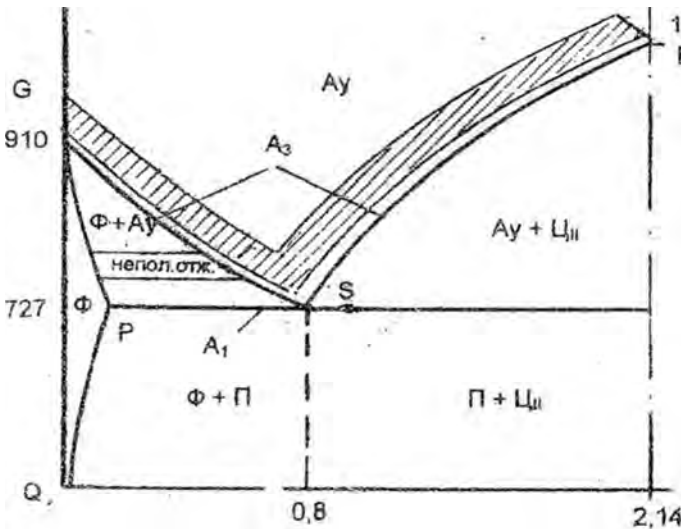


Рис. 2.3. Расположение температур нагрева стали под термообработку на диаграмме состояния Fe-C

Время выдержки. Выдержка нужна, чтобы выровнять температуру по объему детали и для завершения фазовых преобразований. По данным разных исследователей, время выдержки составляет примерно один час на каждые 25–50 мм толщины стенки отливки. Если иметь в виду, что при отжиге нагрев и последующее охлаждение идут принудительно, то время выдержки в общем цикле термообработки относительно невелико. Поэтому названные ранее рекомендации могут быть приняты для ориентировки во время проектирования техпроцессов и корректировки на основе практического опыта.

Скорость охлаждения выбирается в зависимости от требуемых структур и характеристик стали.

Наиболее распространенными видами термообработки являются отжиг, нормализация, закалка, отпуск.

Отжиг заключается в нагреве стали на 30–50 °С выше критической точки A_{c3} , выдержки и последующем принудительном охлаждении (обычно вместе с печью), чтобы придать стали равновесное состояние. Цель отжига – исправление литой неравновесной структуры, уменьшение зерен, снижение твердости, снятие внутренних

остаточных напряжений. Охлаждение с печью можно вести до температуры 400–300 °С, затем на воздухе, так как последующее охлаждение не влияет ни на структуру, ни на внутренние напряжения.

Нормализация заключается в нагреве стали на 30–50 °С выше значения A_{c3} , выдержки и охлаждения на воздухе. Она применяется в том случае, если отжиг не обеспечивает нужного раздробления структуры и необходимого уровня механических характеристик. Скорость нагрева во время выдержки при температуре нагрева для отжига и нормализации одинаковые.

Закалка включает нагревание стали до температуры на 30–50 °С выше, чем A_{c3} , выдержку и последующее быстрое охлаждение в воде, масле, расплавленных солях и других средах. Перед закалкой отливки должны пройти отжиг или нормализацию, чтобы избавиться от видманштетовой структуры и снять внутренние напряжения.

Быстрое охлаждение ведет к переохлаждению аустенита и превращению его в мартенсит – структуру закаленной стали.

Отпуск является заключительной операцией термообработки, от правильности которой зависит качество отливки. Отпуск заключается в нагреве закаленной или нормализованной стали ниже критической точки для получения более стабильной структуры, уменьшения внутренних напряжений, получения заданных механических характеристик (прочности и пластичности).

В зависимости от требований, которые предъявляются к разным отливкам, отпуск может быть низким, средним и высоким.

Низкий отпуск (160–250 °С) применяется для отливок, от которых требуется высокая твердость и износостойкость. При низком отпуске закаленной стали получается структура отпущенного мартенсита.

Средний отпуск (300–500 °С) применяется для отливок, от которых требуется высокая твердость при высокой вязкости. После среднего отпуска сталь приобретает структуру троостита.

Высокий отпуск (500–680 °С) используется для отливок, которые предназначены для знакопеременных нагрузок, от которых требуется высокая прочность и вязкость. Структура после высокого отпуска нормализованной стали – феррит + зернистый перлит, закаленной стали – сорбит. Чем выше скорость охлаждения отливок в процессе термообработки, мельче зерно феррита и перлита, тем выше механические свойства.

Отжиг как окончательная операция термообработки нежелателен, так как является длительным и не обеспечивает высоких механических свойств. Применение стальных отливок без термообработки не допускается.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить шлифы образцов стали и изучить ее микроструктуру и характеристики.
2. Провести термообработку стали 25Л–40Л: отжиг, нормализацию + отпуск, закалку + отпуск.
3. Испытать образцы, прошедшие термообработку, на ударную вязкость и замерить их твердость.
4. Подготовить шлифы образцов после термообработки и исследовать их микроструктуру.

Содержание отчета

1. Краткие сведения о назначении, видах и режимах термообработки углеродистой конструкционной стали.
2. Описание методик проведения термообработки и исследования образцов.
3. Данные металлографических исследований микроструктуры литой и термообработанной стали (эскизы, фотоснимки микроструктур).
4. Данные механических испытаний в виде таблицы.
5. Выводы о влиянии термообработки на структуру и свойства углеродистой стали.

Лабораторная работа № 3

ПЛАВКА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Цель работы: изучить технологию плавки стали в индукционной тигельной печи.

Необходимое оборудование, инструмент, материалы: высокоскоростная индукционная печь (Инвертор), технологическая оснастка для получения образцов, отрезной станок, установка для приготовления шлифов, портативный лазерный спектрометр, металлографический микроскоп, твердомер.

Стальной лом, ферросплавы, электродный бой, раскислители, формы для заливки образцов, кварцевый песок, жидкое стекло, углекислота.

Общие сведения

В сталелитейном производстве широкое распространение получили индукционные печи. Нагрев и расплавление металла в этих печах осуществляется за счет тепла переменного тока, который индуцируется в шихте. После расплавления жидкий металл под воздействием переменного магнитного поля интенсивно перемешивается. В шлаке ток практически не имеет индукции, а направляется он за счет тепла жидкого металла.

Индукционные печи имеют преимущества перед электродуговыми. Благодаря отсутствию графитовых электродов в индукционных печах сталь можно выплавлять с очень низким содержанием углерода. Густой нейтральный шлак хорошо защищает металл от окисления и позволяет получить сталь с пониженным содержанием газа.

Ограниченное развитие реакций между металлом и шлаком обуславливает снижение угара элементов и хорошее усвоение дегирующих добавок. Благодаря электродинамическому перемешиванию металла и незначительному угару элементов в печах стали получают наиболее стабильные по своему химическому составу. При параллельном исследовании среднеуглеродистой стали 35Л, выплавленной в разных печах, наиболее высокие механические свойства были

получены в индукционной печи (табл. 3.1). В то же время низкая температура и активность шлака в индукционной печи не влияют на процессы окисления, дефосфорации, десульфурации, поэтому плавку в этих плавильных агрегатах ведут преимущественно методом переплава.

Таблица 3.1

Качественные показатели стали 35 Л, которая выплавлена в электродуговой и индукционной печах.

| Вид печи | Содержание газов | | | Механические свойства | | | |
|--------------|--------------------|--------|------------------------------|-------------------------|------|------|---------------------------|
| | O ₂ , % | N, % | H, см ³ /100 г | σ _в , МПа | δ, % | ψ, % | КС, кДж/м ² |
| Индукционная | 0,0032 | 0,0067 | 3,6 | 609 | 21,9 | 34,8 | 5,1 |
| Дуговая | 0,0040 | 0,0106 | 4,8 | 595 | 21,8 | 27,5 | 4,4 |

Индукционная печь (рис. 3.1) состоит из набивного огнеупорного тигля 1, катушки индуктора 2, который охлаждается водой, нагревательной обмотки 3, огнеупорного кирпича (5, 6) и специальной огнеупорной обмазки верхней части тигля (8).

Огнеупорная футеровка тигля индукционной печи должна иметь минимально возможную толщину стенки и при этом иметь достаточную механическую прочность и теплопроводность, не проводить электрический ток, противостоять воздействию расплавленных шлаков и не менять размеров при нагреве и охлаждении. Тигель можно набивать кислыми или основными огнеупорными материалами. Кислая футеровка состоит из чистого кварцевого песка с добавкой в качестве связки борной кислоты (2 %).

Для набивки основной футеровки используют молотую отработанную хромомagneзиевую глину с зернистостью 1–4 мм (98 %), а в качестве связки – плавиковый шпат (2 %). Для основных индукционных печей небольшой емкости применяют также магнезитовый порошок в смеси (1:1) с молотой термостойкой магнезитохромистой глиной и другие основные огнеупорные материалы. Оптимальный состав футеровочной массы для основных индукционных печей еще не найдены, и поэтому термостойкость тиглей этих печей

ниже, чем кислых. Они чаще разрушаются по причине возникновения глубоких трещин.

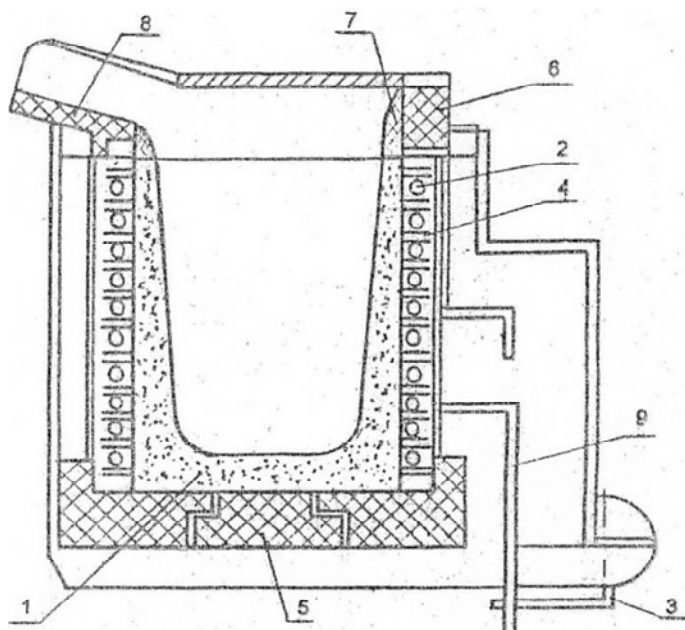


Рис. 3.1. Схема индукционной печи:

- 1 – набивной огнеупорный тигель; 2 – индуктор; 3 – соединительные шины;
4 – прокладки из диэлектрических материалов; 5, 6, 8, – огнеупорный
фасонный тигель; 7 – огнестойкая обмазка; 9 – водяное охлаждение

Электрооборудование индукционной печи без сердечника состоит из машинного генератора и батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности и повышения $\cos \varphi$.

В сталелитейных цехах машиностроительных предприятий применяются, как правило, индукционные печи с кислой футеровкой. Шихтовыми материалами для таких печей являются отходы углеродистой и легированной стали, лом, электродный бой или литейный кокс, ферромарганец, ферросилиций и другие легирующие добавки и раскислители. Для наведения шлака используют сухой кварцевый песок (65 %), свежемолотую глину (25 %) и молотый плавленый шпат. Используют также для наведения шлака бой стекла. В первом

случае окончательный шлак обычно имеет состав: 45–55 % SiO_2 , 10–25 % CaO , 3,5 % Al_2O_3 , 10–20 % MnO , 5–15 % FeO .

Плавка в кислой индукционной печи делится на следующие периоды: загрузка шихты, плавление, доводка, начальное раскисление и выпуск плавки. При плавке среднеуглеродистой стали на чистой, неокисленной шихте скорость окисления углерода составляет 0,001 % в мин, марганца – 0,004–0,007 % в мин. Уровень марганца при расплавлении не превышает 0,15 %. Пригар кремния составляет примерно 0,003 % в мин. Содержание серы и фосфора в процессе плавки не меняется.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе с индукционной печью.
2. Подготовить шихту и произвести расчет для выплавки заданной марки стали и взвесить ее.
3. Провести плавку стали в индукционной печи с подробным хронометражом технологических операций и электрического режима, а также замерами температуры жидкого металла.
4. Залить формы литых образцов стали для химического анализа, микроструктуры и механических испытаний.
5. Зачистить образцы, провести термообработку и механические испытания.
6. Подготовить из образцов шлифы и провести металлографический анализ стали.

Содержание отчета

1. Краткие сведения об особенностях плавки в индукционных печах.
2. Результаты расчета шихты на выплавку стали.
3. Результаты химического анализа состава полученной стали, микроструктура и твердость стали в литом состоянии и после отжига.
4. Выводы о проделанной работе.

Лабораторная работа № 4

ПЛАВКА СТАЛИ В КИСЛОЙ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Проводится на заводе

Цель работы: ознакомиться с технологией плавки стали в дуговой электропечи с кислой футеровкой

Общие сведения

Электродуговые печи с кислой футеровкой емкостью 5 т являются основными плавильными агрегатами при производстве фасонного стального литья на машиностроительных заводах. Схема дуговой печи показана на рис. 4.1.

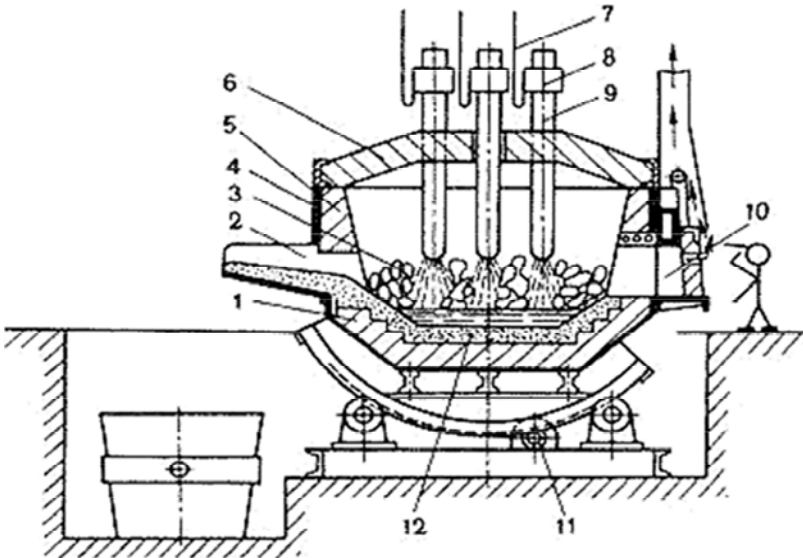


Рис. 4.1. Схема дуговой плавильной печи:

- 1 – огнеупорный кирпич; 2 – сливной желоб; 3 – металлическая шихта;
- 4 – стальной кожух; 5 – стенка; 6 – свод; 7 – кабель; 8 – электрододержатель;
- 9 – цилиндрический электрод; 10 – рабочее окно; 11 – привод; 12 – подина

Дуговая печь питается трехфазным переменным током. Имеет три цилиндрических электрода 9 из графитизированной массы, закрепленных в электрододержателях 8, к которым подводится электрический ток по кабелям 7. Между электродом и металлической шихтой 3 возникает электрическая дуга. Корпус печи имеет форму цилиндра. Снаружи он заключен в прочный стальной кожух 4, внутри футерован огнеупорным кирпичом (основным – магнезитовым, или кислым – динасовым 1). Плавильное пространство ограничено стенками 5, подиной 12 и сводом 6. Съемный свод 6 имеет отверстия для электродов. В стенке корпуса рабочее окно 10 (для слива шлака, загрузки ферросплавов, взятия проб), закрытое при плавке заслонкой. Готовую сталь выпускают через отверстие по сливному желобу 2. Печь опирается на секторы и имеет привод 11 для наклона в сторону рабочего окна или желоба. Печь загружают при снятом своде.

По сравнению с основными электропечами кислые обладают рядом существенных преимуществ. При одинаковой номинальной емкости печи и мощности трансформаторов производительность печей с кислой футеровкой значительно выше основных, а эксплуатационные расходы существенно ниже вследствие высокой стойкости футеровки, меньшего расхода электроэнергии и электродов, значительного снижения трудоемкости технологических операций (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Сравнительные технико-экономические показатели дуговых электропечей ДС-5МТ с кислой и основной футеровкой (сталь 35Л-45Л)

| Показатель | Футеровка | |
|------------------------------------|-----------|----------|
| | кислая | основная |
| Стойкость футеровки, плавок | 230 | ПО |
| Масса плавки, т | 7,1 | 6,3 |
| Длительность плавки, мин | 140 | 185 |
| Производительность, т/час | 3,1 | 2,1 |
| Расход электроэнергии, квт-ч/т | 585 | 670 |
| Расход графитовых электродов, кг/т | 6,2 | 7,4 |

Кислая электропечь футеруется динасовым кирпичом, подина набивается кварцевым песком. Кислые огнеупоры значительно де-

шевле основных и обладают более высокой стойкостью, особенно в условиях периодичности работы литейного цеха с одним, двумя циклами в сутки и остановками на выходные и праздничные дни. Стоимость кислых огнеупоров, приходящихся на 1 т стали, примерно в 2,5 раза меньше, чем основных.

Глубина ванны в кислых печах значительно больше, чем в основных, что позволяет работать с большим перегрузом без ущерба для стойкости футеровки. Операции окисления и доводки, предусматривающие получение заданного состава и соответствующего нагрева стали, проводят форсированно, что повышает производительность печей в 1,3–1,5 раза при одновременном снижении удельного расхода электроэнергии и дорогостоящих электродов.

Кислые, силикатные шлаки менее электропроводны, чем известковые основные, поэтому большая мощность электрической дуги выделяется непосредственно в шлаке и на поверхности жидкого металла, передавая ему тепло и быстрее нагревая металл. По этой же причине кислые шлаки имеют более низкую температуру, чем основные, в меньшей степени отражают энергию дуг на стены и свод печи, существенно уменьшают их нагрев и износ.

Все вышеперечисленные факторы позволяют получать более высокие технико-экономические показатели кислого процесса и способствуют широкому применению дуговых электропечей с кислой футеровкой. Сравнительный анализ свойств сталей, выплавленных в кислой и основной печах, показывает, что кислая сталь получается более прочной и менее пластичной, а основная сталь оказывается физически более однородной (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Механические свойства стали 30Л, выплавленной в кислой и основной печах

| Способ плавки | Средние механические свойства | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|------------------|--------------|------------|------------------------|-----|
| | σ_b , МПа | σ_s , МПа | δ , % | Ψ , % | КС, кДж/м ² | НВ |
| Плавка в кислой электродуговой печи | 622 | 354 | 16,1 | 20 | 4,2 | 178 |
| Плавка в основной электродуговой печи | 537 | 303 | 31,7 | 41,4 | 7,6 | 158 |

Кислая сталь имеет меньшее содержание кислорода и азота и несколько лучшую жидкотекучесть, чем основная.

В печах с кислой футеровкой не происходит удаление вредных примесей серы и фосфора, поэтому для данного процесса подбирают низкофосфористую и низкосернистую шихту. Шихту обычно составляют из стального лома – 40–60 % и отходов собственного производства (литники, скрап, бракованные отливки) – до 50 %. При мягкой шихте (с низким содержанием углерода) добавляют 10–15 % чушкового чугуна. В качестве шлакообразующих применяют сухой формовочный песок, известь (известняк) и в небольшом количестве железную руду. Возникающие при плавлении шихты окислы железа и марганца взаимодействуют с кремнеземом футеровки и образуют насыщенные кремнеземом железомарганцевые силикаты. Кремнезем вносится также пригаром формовочной смеси на отходах и песком. Для разжижения шлака и уменьшения в нем тяжелых окислов вводят известь. Конечный шлак имеет примерно следующий состав: SiO_2 – 55 %; CaO – 10 %; FeO – 10 %; MnO – 15 %; Al_2O_3 – 5 %.

Плавку в кислой дуговой электропечи проводят под одним шлаком, чаще методом переплава и реже с окислением. Основные периоды «кислой» плавки:

1. Заправка печи после выпуска предыдущей плавки (5–10 мин).
2. Завалка шихты (5–10 мин).
3. Расплавление (70–120 мин в зависимости от мощности печного трансформатора).
4. Короткий окислительный период (10–15 мин при плавке с окислением).
5. Доводка по температуре и составу (20–40 мин).
6. Раскисление и выпуск плавки (5–10 мин).

Средняя продолжительность плавки в 5 т кислых дуговых электропечах колеблется от 130 до 180 мин.

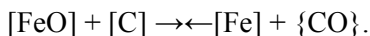
В процессе плавки под воздействием высокой температуры и химической активности жидкого металла и шлака, а также из-за механических повреждений футеровка печи, особенно в подине и на уровне откосов, изнашивается. Поэтому после выпуска предыдущей плавки из печи удаляют остатки шлака, а на поврежденные места забрасывают сухой кварцевый песок, смоченный жидким стеклом. Благодаря высокой температуре футеровки заправочный материал хорошо сваривается с ней.

Загрузка шихты в современных печах производится при выкаченном корпусе печи или отведенном в сторону своде с помощью специальной бадьи с открывающимся днищем. Для быстрого расплавления шихты рекомендуется на подину печи загрузить часть мелкой шихты, в центр печи под электроды крупную, а ближе к откосам и на крупный лом загружают куски шихты средней величины и остатки мелкой шихты.

После окончания завалки электроды опускают вниз и включают ток. Расплавление шихты ведут на максимальной мощности трансформатора, для чего первичные обмотки переключают на треугольник, повышая вторичное напряжение до 220–260 В. Под действием высокой температуры дуг шихта под электродами плавится, жидкий металл стекает вниз, накапливаясь в центральной части подины. Электроды опускаются, прорезая в шихте колодцы диаметром на 30–40 % больше диаметра электрода. По мере плавления шихты и подъема уровня жидкого металла электроды поднимаются, так как автоматические регуляторы поддерживают длину дуг постоянной. Для ускорения плавления остатки шихты сталкивают с откосов под дуги. Для предохранения жидкого металла от окисления в печь для наведения шлака дают отработанную формовочную смесь, песок.

Плавку в кислой дуговой электропечи обычно ведут методом переплава. Однако при наличии легковесной, загрязненной шихты проводят короткий окислительный период, целью которого является удаление из металла газов и вредных примесей. Для проведения окислительного периода шихту рассчитывают таким образом, чтобы по расплавлению содержания углерода в жидком металле было на 0,05–0,1 % выше заданного.

По расплавлению металла отбирают пробу на химанализ, на шлак дают железную руду и нагревают металл. По мере повышения температуры развивается реакция обезуглероживания и металл закипает.



При достижении содержания углерода несколько ниже заданного кипение ванны прекращают присадкой ферромарганца из расчета на среднее содержание и приступают к доводке металла по химсоставу и температуре. В этот период плавки печной трансформатор переключают с треугольника на звезду и уменьшают вторичное напряжение до 100–120 В.

Заключительным периодом плавки, определяющим качество стали, является конечное раскисление, формирующее природу и характер неметаллических включений. Сталь обычного назначения раскисляется алюминием в количестве 1 кг/т, который вводят в виде чушек, закрепленных на шомполах, в печь под шлак или в ковш. При комплексном раскислении алюминий вводят в печь, силико-кальций под струю металла, а ферроцерий в ковш.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе на дуговой электропечи в условиях литейного цеха.
2. Ознакомиться с устройством дуговой электропечи.
3. Ознакомиться с шихтовыми и шлакообразующими материалами, их химсоставом. Записать состав шихты.
4. Провести хронометраж плавки. Данные замеров занести в таблицу.

Содержание отчета

1. Краткие сведения о технико-экономических преимуществах плавки стали в кислых электродуговых печах.
2. Описание технологии плавки стали в кислой дуговой электропечи.
3. Данные хронометража плавки в виде табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты хронометража плавки стали в дуговой электропечи

| Вре- мя, час, мин | Технологические опе- рации, отбор проб, вид и количество присажива- емого материала | Электрический режим | | | Хим. состав, % | | | | | |
|----------------------------|--|------------------------|--------|------------|----------------|----|----|---|---|--|
| | | I, A | U, B | $\cos\phi$ | C | Si | Mn | S | P | |
| | | | | | | | | | | |

4. По данным хронометража сделать анализ технологии плавки, отметить возможные недостатки и предложения по их устранению.

Лабораторная работа № 5

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ МАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы: изучение технологических особенностей получения отливок из высоколегированной стали.

Необходимое оборудование, инструмент и материалы: плавильная печь, образцы стали 110Г13Л, отлитые в сухую песчаную форму, печь для термической обработки, установка для подготовки шлифов, металлографический микроскоп, твердомер.

Общие сведения

Высоколегированная марганцовистая сталь 110Г13Л (так называемая сталь Гадфелда) по своим специальным свойствам занимает особое место среди высоколегированных сталей аустенитного класса.

Высокое содержание марганца (11,5–15,5 %) дает стали возможность упрочняться при воздействии ударной нагрузки и создавать наклеп, который повышает поверхностную твердость с 170–200 до 600–800 НВ. Такое повышение поверхностной твердости придает литым изделиям высокую износостойкость в условиях трения с одновременным ударным воздействием (в 8–10 раз большую, чем у стали 35Г).

Максимальное сопротивление износу при одновременном ударном воздействии сталь 110Г13Л приобретает при чисто аустенитной структуре, которая получается после закалки при температуре 1000–1050 °С в воде, или (для тонкостенных отливок) на воздухе.

При естественном охлаждении отливок структура их состоит из аустенита и карбидов (Fe, Mn)C переменного состава. Обычно эти карбиды размещаются на границах зерен аустенита. Чем медленнее охлаждение, тем больше выделяется карбидов и тем они крупнее.

В процессе закалки карбиды переходят в твердый раствор и сталь получает однородную аустенитную структуру. Температура и время для закалки должны быть достаточными, чтобы растворились карбиды в аустените. При недостаточной выдержке карбиды не успевают раствориться и при последующем охлаждении опять выпадают

из твердого раствора. Такой неправильный температурный режим приводит к резкому понижению износостойкости и пластичности стали, может привести к внезапной поломке детали, что и является недостатком такой стали. Время выдержки стали при температуре не ниже 1125 °С для получения чисто аустенитной структуры должно составлять 1 час на каждые 25 мм толщины стенки отливки. Состав стали 110Г13Л согласно ГОСТ колеблется в пределах 0,9–1,4 % С, 0,6–1 % Si, 10–14 % Mn, 0,08–0,12 % P, 0,02–0,04 % S.

Механические свойства в закаленном состоянии характеризуются следующими показателями:

$\sigma_b \rightarrow G_b = 800\text{--}100 \text{ МПа}$; $\varphi = 40\text{--}50 \%$; $KC = 2000\text{--}3000 \text{ кДж/м}^2$;
 $\sigma_s \rightarrow 250\text{--}400 \text{ МПа}$; $\delta = 35\text{--}45 \%$; $HB = 180\text{--}220$.

Сталь 110Г13Л широко применяется для отливок траков гусениц тракторов, в горном деле – для дробления руды, для отливки ковшей экскаваторов, козырьков и зубьев землеройных машин.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить шихту для выплавки заданной марки стали и взвесить ее.

2. Провести плавку стали в индукционной печи, залить формы и получить литые образцы для исследований.

3. Зачистить образцы, провести их термообработку на аустенитную структуру (закалка в воде при 1050 °С).

4. Подготовить из образцов шлифы и провести металлографический анализ литой стали и после термообработки. Зарисовать структуры.

5. Сравнить наклепанность стали 110Г13Л по одному из двух вариантов:

а) измерить твердость шариком диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кг, затем определить твердость дна лунки шариком диаметром 5 мм при нагрузке 750 кг;

б) измерить начальную твердость стали 110Г13Л и твердость после наклепа, полученного на лабораторном прессе.

6. Сравнить структуру стали 110Г13Л в литом и закаленном состоянии.

Содержание работы

1. Краткая характеристика технологических особенностей получения отливок из высокомарганцовистой стали 110Г13Л.
2. Расчет шихты на плавку стали 110Г13Л в индукционной печи.
3. Результаты исследования структуры стали в литом состоянии и после закалки, твердости и влияния термообработки на наклепываемость стали 110Г13Л в виде зарисовок микроструктур, таблиц и графиков.

Лабораторная работа № 6

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 5ХНМ

Цель работы: изучить свойства и структуру инструментальной штамповой стали умеренной теплостойкости и повышенной ударной вязкости.

Необходимое оборудование, инструмент и материалы: высокоскоростная индукционная печь, технологическая оснастка для получения образцов, отрезной станок, установка для приготовления шлифов, портативный лазерный спектрометр, металлографический микроскоп, твердомер.

Стальной лом, ферросплавы, электродный бой, раскислители, формы для заливки образцов, кварцевый песок, жидкое стекло, углекислота.

Общие сведения

Сталь 5ХНМ относится к инструментальным штамповым сталям, предназначенным для изготовления инструментов, деформирующих металл.

Штамповые стали делятся на две группы: стали для холодного деформирования и стали для горячего деформирования.

Штамповые стали для холодного деформирования применяются в основном для изготовления штампов для обрубки облоя, накатные

ролики и плашки, фильеры для волочения и др. Эти изделия должны обладать высокой износостойкостью при достаточной прочности.

Штамповые стали для горячего деформирования должны обладать высоким сопротивлением пластической деформации, высокой теплостойкостью и высокой разгаростойкостью, т. е. высоким сопротивлением термической усталости. Кроме того, они не должны быть чувствительными к отпускной хрупкости.

Из этих сталей изготавливают молотковые штампы, которые обладают высокой ударной вязкостью и высокой прокаливаемостью. Кроме того, штампы должны обладать однородной структурой по всему сечению. Это достигается при легировании сталей никелем, молибденом и вольфрамом. Молотковые штампы изготавливают в основном из сталей марок 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ, 5ХНТ и др., разработанных еще в 30-х годах прошлого столетия. Эти стали имеют примерно одинаковые механические свойства (σ_b от 600 до 1500 МПа, КСИ от 300 кДж/м²), а наибольшая прокаливаемость у стали 5ХНМ.

Химический состав сталей приведен в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Химический состав шлаковых сталей умеренной теплостойкости и повышенной ударной вязкости

| Марка стали | C | Mn | Si | Ni | Cr | W | Mo |
|-------------|------|------|------|-----|------|------|------|
| 5ХНМ | 0,55 | 0,65 | 0,25 | 1,6 | 0,7 | – | 0,25 |
| 5ХНВ | 0,55 | 0,65 | 0,25 | 1,6 | 0,7 | 0,55 | – |
| 5ХГМ | 0,55 | 1,4 | 0,45 | – | 0,7 | – | 0,2 |
| 5ХНСВ | 0,55 | 0,45 | 0,75 | 1,2 | 1,45 | 0,55 | – |

Неметаллические включения (сульфиды, оксиды, силикаты) особенно в поверхностных слоях по границам зерен, служат очагами зарождения усталостных трещин и легко выкрашиваются, это ухудшает главным образом сопротивление контактной усталости и разгаростойкости. В присутствии повышенного количества оксидов и силикатов затрудняется также получение более чистой поверхности при шлифовании и полировании.

Оксиды и силикаты в инструментальных сталях выделяются в виде округлой или неправильной формы, и количество их зависит от условий плавки, технологии рафинирования и модифицирования.

Содержание газов азота при выплавке в электродуговой печи не превышает 0,025 %, кислорода – 0,01 %, водорода – 0,0005 %.

Выплавка стали в вакууме снижает содержание газов и неметаллических включений, располагающихся по границам зерен, возрастает плотность и повышаются механические свойства. Степень необходимого разряжения зависит от марки стали и от ее структурного класса. Значительнее сказывается влияние чистоты стали для инструментов, имеющие тонкие рабочие кромки. Стали, выплавленные в вакуумной индукционной печи, целесообразны при использовании для штампов, которые должны сочетать сопротивление пластической деформации с устойчивостью против динамических нагрузок.

При электрошлаковом переплаве ускоряется охлаждение в процессе кристаллизации, способствующие получению более мелких карбидных частиц, что повышает механические свойства – вязкость, а также увеличивается эластичность в поперечном сечении. Использование ЭШП рационально в первую очередь для литого инструмента или малодеформируемого.

Свойства штамповых сталей (5ХНМ, 5ХНВ, 5ХГМ и др.) зависят также от формы, количества и формы карбидных включений.

Карбиды – более твердые и, вместе с тем, более хрупкие, чем мартенсит, составляющие инструментальных сталей.

По влиянию на структуру и свойства различают карбиды растворимые и нерастворимые.

К растворимым относятся эвтектоидные карбиды, находящиеся в перлите и переходящие в раствор при превращении $P \rightarrow A$, и та часть вторичных карбидов, растворяющихся при более высоких температурах закалки, не вызывающих значительного роста зерна.

Насыщение аустенита, достигаемое растворением карбидов, обеспечивает прокаливаемость и закаливаемость, создает условия для дисперсного твердения при отпуске, что повышает твердость на HRC 3–10. При этом незначительно снижается вязкость, а степень охрупчивания зависит от условий выделения карбидов.

Избыточные карбиды – это эвтектические карбиды, выделяющиеся при затвердевании в составе эвтектики, которые не растворяют-

ся в аустените при нагреве. Такого рода карбиды не изменяются при термической обработке и препятствуют росту зерна при нагреве.

В сталях 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ содержатся в основном растворимые карбиды.

Для изменения размеров формы и распределения карбидов проводят модифицирование стали. Модифицирование способствует образованию дополнительных центров кристаллизации, что создает условия для получения более мелких карбидов.

Для модифицирования инструментальных сталей широко применяют добавки церия, титана, циркония.

Применение комплексных модификаторов позволяет уменьшить размер карбидом на 15–20 %. Кроме того, титан и цирконий уменьшают чувствительность к перегреву к закалке, способствуя сохранению более мелкого зерна. Церий улучшает прочность и вязкость, меняя структуру и форму сульфидных включений. Более высокие результаты по ударной вязкости достигаются при обработке расплава присадками, содержащими РЗМ и ЦЗМ (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Влияние модифицирующей обработки на ударную вязкость стали 5ХНМ

| Величина добавки, % | 0,015 РЗМ | 0,0005 РЗМ 0,0001 Са | 0,001 РЗМ 0,001 Са | 0,01 РЗМ 0,05 Са |
|--|-----------|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| Ударная вязкость КС, Дж/м ² | 41 | 50 | 55 | 54 |

До термообработки структура стали зависит от скорости охлаждения и состоит из перлита, сорбита или троостита.

Для обеспечения необходимых механических свойств и эксплуатационной надежности штамповые стали (5ХНМ и др.) подвергают отжигу с последующей закалкой и отпуску.

Отжиг осуществляют при температуре 760–800 °С с целью полного устранения чувствительности, изменения структуры. Чаще всего ограничиваются отпуском при температуре 650–690 °С и получают структуру зернистый перлит. Температура закалки для сталей

5ХНМ, 5ХНВ и др. составляет 820–860 °С. При нагреве для закалики обязателен подогрев при 600–650 °С. Структура стали после ТО приведена на рис. 6.1.

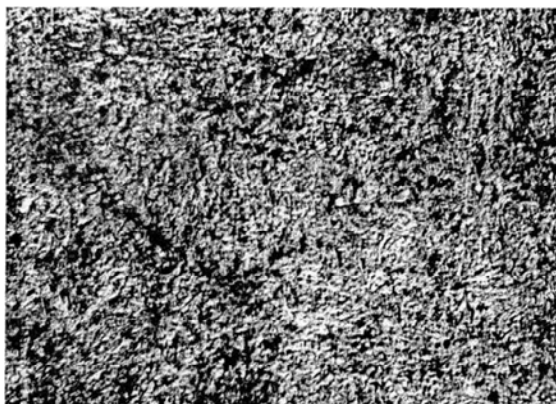


Рис. 6.1. Структура стали 5ХНМ после термообработки

Для уменьшения окисления и обезуглероживания поверхность штампов защищают следующим образом: на поддоны насыпают слой обработанного древесного угля или чугушной стружки, на него рабочей поверхностью укладывают штамп и засыпают древесным углем.

Штампы со сложной гравюрой не охлаждают до конца в масле, так как это может вызвать значительное напряжение и трещины. Их вначале подстуживают до температуры 750–780 °С, а затем помещают в масло, но выдержка в масле не должна полностью охладить штамп.

После выдержки неостывшие штампы переносят в печь для отпуса.

Иногда штампы при закалке охлаждают воздушной смесью. Рекомендуется охлаждение при расходе воды до 100 л/ч, расстояние распылителя от закаливаемой поверхности 500 мм и давление 0,3 МПа.

Так как в структуре штампа после закалки имеется много остаточного аустенита, то для его превращения целесообразно двойной отпуск. Температура второго отпуска на 10–20 °С, а продолжительность на 20–25 % меньше, чем первого.

В последнее время для определенной номенклатуры применяют литые штампы. Изготовление штампов отливкой с последующей термической обработкой на требуемую твердость позволяет отказаться отковки и сокращает обработку резанием, особенно штампов со сложной фигурой, что значительно удешевляет их стоимость. Прочностные свойства и теплостойкость литой стали близки к аналогичным свойствам ковальной. Основные различия заключаются в вязкости и износостойкости. Вязкость литых сталей этого класса на 25–35 % ниже, чем кованных. Однако, износостойкость в литых штампах несколько выше за счет повышенного содержания углерода и легирующих элементов в поверхностных слоях зерен.

Применение литых штампов оправдывается при условии правильного выбора области их использования, состава стали, а также параметров литья и режимов термической обработки.

Литые штампы преимущественного небольшого сечения применяют для работы при отсутствии повышенных ударных нагрузок и интенсивного охлаждения, когда требования к разгаростойкости не являются преобладающими.

Рационально выбирать более вязкие стали с меньшим содержанием углерода (27Х2НМВФ). Стали с большим содержанием углерода (5ХНМ) рекомендуются использовать для вставок.

Вязкость, достигаемая в литой стали, кроме того, несколько больше в результате более интенсивного охлаждения в процессе кристаллизации, достигаемого литьем в оболочковые, а не в земляные формы.

Режим термообработки для литых штампов целесообразно изменять. Повышение на 100–150 °С температуры аустенизации и изотермическая выдержка в области перлитного превращения позволяет получить более благоприятную для сталей микроструктуру зернистого перлита. Более высокий (на 30–50 °С), по сравнению с деформированной аналогичного состава, нагрев литых сталей под закалку способствует более полному переходу в твердый раствор первичных карбидов и последующему получению обогащенного легирующими элементами мартенсита, что положительно сказывается на механических свойствах. Так, повышение температуры закалки с 960 до 900 °С приводит к стабильному увеличению значений ударной вязкости литой стали 5ХНМ на 20 %.

Порядок выполнения работы

1. Подобрать материалы и произвести расчет шихты на плавку стали 5ХНМ.

2. На высокоскоростной индукционной плавильной установке произвести выплавку стали, ее раскисление и легирование и залить образцы для исследований.

3. Провести термообработку стали 5ХНМ (отжиг, закалка в масле, отпуск).

4. Оценить структуру стали (размер зерен перлита, количество и распределение карбидов) до ТО. Зарисовать структуру.

5. Сравнить структуру стали 5ХНМ в литом и термообработанном состоянии.

Содержание работы

1. Краткая характеристика структуры и свойств стали 5ХНМ.

2. Результаты плавки стали 5ХНМ.

3. Анализ влияния ТО на изменение структуры стали 5ХНМ.

4. Выводы.

Лабораторная работа № 7

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

Цель работы: изучить свойства и структуру хромоникелевой жаропрочной стали 35X18H24C2Л.

Необходимое оборудование, инструмент и материалы: высокоскоростная индукционная печь, технологическая оснастка для получения образцов, отрезной станок, установка для приготовления шлифов, портативный лазерный спектрометр, металлографический микроскоп, твердомер.

Стальной лом, ферросплавы, электродный бой, раскислители, формы для заливки образцов, кварцевый песок, жидкое стекло, углекислота.

Общие сведения

Высоколегированная хромоникелевая жаропрочная сталь 35X18H24C2Л относится к сталям со специальными свойствами.

Данная сталь применяется для изготовления отливок, работающих в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение заданного времени и обладающих при этом достаточными механическими свойствами. Из нее изготавливают различные детали, к которым предъявляются высокие требования по окислостойкости, прочности при высокой температуре и трещиностойкости при циклических сменах температур (лопатки турбин, радиационные трубы, поддоны печных агрегатов, муфеля, колосниковые решетки печей для цементной промышленности и др.), работающие при температурах от 650 °С до 1000 °С.

Эти стали обладают высокой прочностью и не претерпевают в процессе охлаждения и нагрева полиморфных превращений. Эксплуатационная стойкость деталей из них при повышенных температурах определяется структурой, полученной за счет легирования и модифицирования в процессе плавки.

В литом состоянии высоколегированные хромоникелиевые стали с 0,3–0,5 % углерода имеют аустенитную основу с выделениями

карбидов хрома ($Cr_{23}C_6$) в междендритных областях и в небольшом количестве по границам зерен (рис. 7.1).

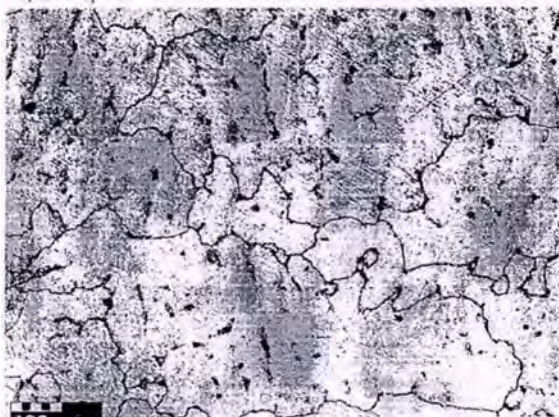


Рис. 7.1. Структура литой жаропрочной стали до эксплуатации

В процессе длительной эксплуатации поддонов в окислительной атмосфере в температурном интервале 200–900 °С в структуре происходит перераспределение карбидной фазы. Она выделяется в дисперсном виде по всему объему аустенита и в более крупном виде по границам. По таким границам происходит охрупчивание материала и разгар (рис. 7.2).



Рис. 7.2. Структура литой жаропрочной стали после эксплуатации 3–4 месяца

При эксплуатации деталей из жаростойких сталей в восстановительной атмосфере (печи цементации) в том же температурном интервале также перераспределяется карбидная фаза; она выделяется по всему объему аустенитного зерна. По мере эксплуатации карбиды увеличиваются по объему и размерам за счет диффузии углерода из углеродосодержащей атмосферы печи. Это приводит к повышению твердости и охрупчиванию материала оснастки.

Эксплуатационная стойкость этих сталей во многом определяется химическим составом, свойствами самого аустенита, загрязненностью межзеренных границ неметаллическими включениями и наличием карбидных включений.

Наиболее высокие свойства стали достигаются при получении однородной структуры аустенита с карбидным упрочнением.

Высокая жаропрочность достигается за счет повышенного содержания хрома и никеля. При этом, как правило, для деталей, работающих в более «жестких» термических условиях, содержание никеля повышают до 24–35 %, а в некоторых случаях и выше.

Отливки из жаропрочных аустенитных сталей, предназначенные для длительной работы, подвергают термической обработке: закалке от температур 1100–1150 °С и отпуску при температуре, превышающей на 100–150 °С рабочую.

Жаропрочные отливки с малым сроком эксплуатации подвергаются, как правило, только закалке. В них карбиды будут выделяться в процессе эксплуатации при рабочих температурах.

Состав стали 35X18H24C2Л, относящейся к жаропрочным аустенитным классам, колеблется в пределах: 0,3–0,4 % С; 16–20 % Cr; 22–26 % Ni, 1,5–2,0 % Si.

Механические свойства в литом состоянии характеризуются следующими показателями:

$$\sigma_b = 520 \text{ МПа}; \sigma_T = 300 \text{ МПа}; \text{НВ-190.}$$

Правку стали проводят как методом переплава, так и окислением. Плавку переплавом проводят в основном в кислых печах, используя при этом в качестве шихты легированный хромом лом и возврат собственного производства.

Раскисление стали осуществляют алюминием и ферросилицием в печи, а окончательное раскисление осуществляют в ковше при сливе металла.

При проведении плавки методом окисления в основных печах в качестве шихты используют углеродистую сталь.

В окислительный период доводят содержание углерода до 0,1–0,2 %, снижают содержание Р до 0,01–0,02 %, затем вводят феррохром и никель, доводя их содержание до марочного состава.

За 5–10 минут до слива металла проводят глубинное раскисление алюминием и ферросилицием и сливают металл в ковш, проводя окончательное раскисление.

Заливку форм проводят при температуре 1630–1650 °С.

Эксплуатационная надежность деталей, изготовленных из сталей, во многом зависит от наличия в отливке различного рода литейных дефектов – раковин и усадочной пористости, неспаев и т. д. Это является одной из основных причин выхода из строя жаростойкой оснастки печного оборудования. Поэтому конструкции оснастки и технологии ее заливки должно быть уделено особое внимание.

Улучшение структуры стали в литом состоянии и повышение ее литейных свойств, может быть достигнуто за счет дополнительной модифицирующей обработки редкоземельными и щелочноземельными металлами.

При модифицировании стали происходит разрушение микрогруппировок, в которые входят легирующие элементы, повышая гомогенность расплава. Изменяется морфология неметаллических включений, поверхностное натяжение расплава, а также физические свойства жидкой стали, температура ликвидуса и интервал кристаллизации. Это приводит к изменению структуры самого металла, а также оказывает влияние на формирование тех или иных дефектов.

Для модифицирующей обработки жаропрочных сталей широко используются щелочноземельные элементы Са, Ва. Эти элементы применяются в виде лигатур SiCa, SiBa.

Модифицирующая обработка стали этими элементами после предварительного раскисления алюминием приводит к повышению предела прочности и относительного удлинения при сохранении твердости на одном и том же уровне, по сравнению с исходным расплавом (табл. 7.1).

Влияние модифицирующей обработки лигатурами щелочноземельных металлов на свойства жаропрочной стали

| Используемая лигатура | Величина присадки | Механические свойства | | | |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------|---------------|--------------|
| | | σ_b , МПа | σ_T | относ. удл. % | твёрдость НВ |
| Исходный | – | 520 | 300 | 26 | 190 |
| SiCa | 0,1 | 580 | 340 | 28 | 179 |
| | 0,2 | 620 | 360 | 30 | 179 |
| | 0,3 | 630 | 358 | 33 | 170 |
| SiBa | 0,1 | 580 | 360 | 34 | 170 |
| | 0,2 | 670 | 390 | 39 | 190 |
| | 0,3 | 678 | 376 | 40 | 170 |

Модифицирующая обработка расплава стали лигатурами щелочноземельных элементов приводит к уменьшению размеров аустенитного зерна и карбидных включений (рис. 7.3).

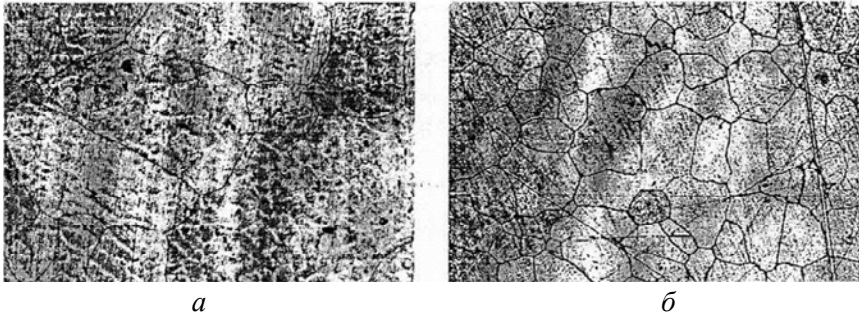


Рис. 7.3. Влияние обработки расплава жаропрочной стали аустенитного класса 35X18H24C1L на изменение структуры:
a – без обработки; *б* – после обработки 0,2 % SiCa

За счет снижения температуры ликвидус и уменьшения интервала кристаллизации, после модифицирования щелочноземельными металлами жидкотекучесть повышается на 10–20 %. Это снижает склонность к образованию раковин и газоусадочной пористости.

В целом улучшение технологических (литейных) свойств стали повышает ее жаропрочность и окалиностойкость.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методичкой по выполнению лабораторной работы.

2. Подготовить шлифы и образцы для механических испытаний из стали 35X18H24C2Л.

3. Оценить влияние на структуру стали высокотемпературного воздействия в процессе эксплуатации отливок.

4. Проанализировать влияние модифицирующей обработки на структуру и свойства жаропрочной стали.

Содержание работы

1. Характеристика структуры и свойств стали 35X18H24C2Л в литом состоянии.

2. Анализ результатов исследования воздействия модифицирующей обработки на структуру и свойства жароупорной стали аустенитного класса.

3. Выводы.

Лабораторная работа № 8

ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ СТАЛИ

Проводится на заводе

Цель работы: ознакомиться с технологией плавки стали методом электрошлакового литья.

Общие сведения

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) – это метод получения отливок фасонных отливок в водоохлаждаемой металлической литейной форме на основе применения электрошлакового процесса плавления расходного электрода.

В отличие от других методов литья ЭШЛ основано на одновременной непрерывной плавке и выпуске жидкого металла в одном с литейной формой агрегате. Стальной расходный электрод плавится теплом, которое выделяется в электропроводном шлаке при пропускании через него электрического тока. Капли жидкого металла с оплаваемого конца электрода протекают через шлаковую ванну в водоохлаждаемую литейную форму, которая выполняет две функции: служит местом для плавки металла и используется для формирования отливки.

В зависимости от степени сложности отливки применяются две схемы ЭШЛ.

В одной из них металл, который идет на формирование отливки, плавится и кристаллизуется непосредственно в литейной форме (рис. 8.1).

По другой схеме процесс получения отливки ведут частичным или полным переливом жидкого металла из плавильной емкости в литейную форму. При переливе удается повысить степень рафинирования жидкого металла, а также создаются совсем новые возможности получения отливок сложной и разностенной формы.

К преимуществу ЭШЛ можно отнести и отсутствие взаимодействия жидкого металла с материалом литейной формы. Шлаковая ванна, температура которой на 150–200 °С превышает температуру плавления металла расходного электрода, служит активным сред-

ством рафинирования и ассимилирует неметаллические включения типа сульфидов, окислов, нитридов, надежно оберегает жидкий металл от окисления во время транспортировки его в литейную форму. Отливка имеет поверхность, которая практически не требует последующей механической обработки, так как выплавляется в тонкой оболочке шлака.

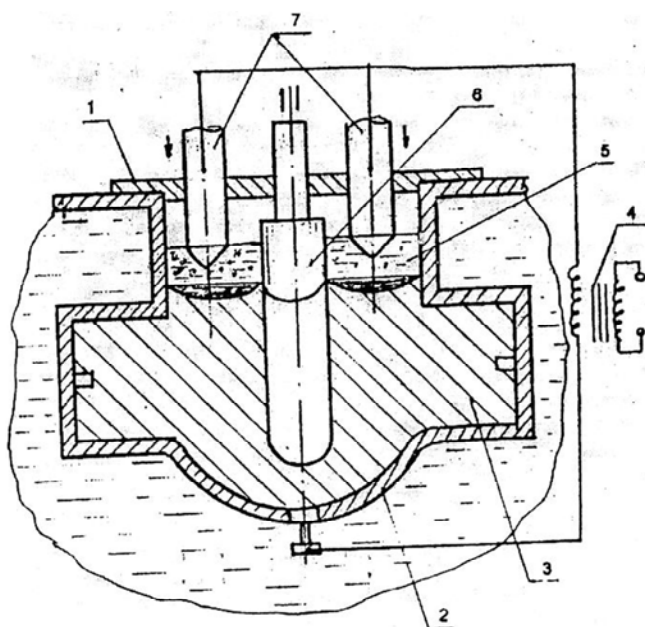


Рис. 8.1. Схема ЭШЛ при формировании отливки в литейной форме:
 1 – элемент усиления дорна; 2 – водоохлаждаемая форма; 3 – выплавленная отливка;
 4 – источник переменного тока; 5 – шлаковая ванна; 6 – водоохлаждаемый дорн;
 7 – расходные электроды

Кроме того, если применить ЭШЛ, отпадает потребность в плавных печах, различных ковшах, формовочных смесях. Последовательное наплавление отливок позволяет отказаться от литников и прибылей. В состав основного оборудования входит электрошлаковая печь; водоохлаждаемая форма, источник энергии: вспомогательного – приспособление для заливки шлака, стенд для сборки и сварки электродов.

Важнейшей частью установки ЭШЛ является водоохлаждаемая медная форма, в которой отливка может выплавляться целиком или отдельными частями будущего изделия (остальные предварительно подготовленные элементы устанавливаются в соответствующие полости формы и во время выплавки отдельной части изделия привариваются к ней). Отливки, как правило, имеют сложную конфигурацию, и поэтому форму делают разъемной. При этом разборка форм может осуществляться после выплавки отливки или в процессе, когда закристаллизованные части отливки избавляются от частей формы, чтобы обеспечить свободную усадку.

К числу основных материалов, которые применяются при ЭШЛ, принадлежат расходные электроды, флюс и, в случае необходимости, лигатуры, модификаторы, раскислители.

Электроды изготавливают методом непрерывного литья, центростремительного литья, литья в графитовые формы или в чугунные изложницы, а также из проката.

Флюс является источником тепла и служит основным средством сохранения и регулирования химсостава металла, который переплавляется. От активности флюса зависит степень очистки металла от вредных примесей и сохранение в нем легированных элементов. При ЭШЛ применяют флюсы на основе фторидов, которые обладают универсальными свойствами.

Таблица 8.1

Состав наиболее распространенных флюсов для ЭШЛ

| Флюс | Расчетный состав (по массе), % | | | |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|
| | CaF ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO |
| АНФ-6 | 70 | 30 | – | – |
| АНФ-7 | 80 | – | 20 | – |
| АНФ-8 | 60 | 20 | 20 | – |
| АНФ-29 | – | 55 | 45 | – |
| АНФ-291 | 18 | 40 | 25 | 17 |
| АНФ-292 | – | 60 | 35 | 15 |
| АНФ-295 | 14 | 50 | 30 | 6 |

Перед началом работы флюс предварительно расплавляют в тигле графитовым электродом. Чтобы начался процесс ЭШЛ, жидкий шлак заливают в водоохлаждаемую форму сифонным методом или через верх. Начало плавки может быть также на «твердом» старте, для чего на дно плавильной емкости укладывают шлак. Расходный электрод опускают до контакта со шлаком, засыпают электропроводный флюс, включают ток, чтобы загорелась электрическая дуга. По мере расплавления флюса его количество в плавильной емкости увеличивают до 20 % от веса изделия, которое отливается. После создания шлаковой ванны расходуемый электрод начинают подавать со скоростью, которая обеспечивает величину тока плавки, равной $(30-40)d$ (d – диаметр расходуемого электрода, мм). Температуру металла и шлака измеряют термопарой погружения при отсутствии напряжения в цепи электрод-плавильной емкости.

Высокое качество литья ЭШЛ, в первую очередь, обязано рафинирующему действию шлака при переплавке и способствует условиям последовательного наплавления и кристаллизации отливки.

При ЭШЛ химсостав стали практически не меняется, но повышаются ее пластические свойства. Структура отливки улучшается, увеличивается пластичность металла, снижается его пористость. Так, в конструкционных сталях количество неметаллических включений снижается более чем в 2–3 раза, и снижается склонность сталей к образованию горячих трещин.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе на ЭШЛ-установке в условиях цеха.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы электрошлаковой установки.
3. Ознакомиться с шихтовыми и шлакообразующими материалами. Записать состав выплавленного металла, флюса.
4. Ознакомиться с приспособлениями для расплавления и заливки шлака, подготовки электродов.
5. Провести хронометраж плавки с замером температуры воды, шлака, металла. Данные замеров и результаты опытной плавки занести в таблицу.

Содержание работы

1. Краткие сведения о сущности ЭШЛ, его преимуществах.
2. Описание конструкции и принципа работы установки ЭШЛ.
3. Описание технологии ЭШЛ стали.
4. Данные хронометража и результаты плавки.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 9

ПЛАВКА СТАЛИ В ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Цель работы: изучить технологические особенности плавки литейных сплавов в вакуумной индукционной печи.

Необходимое оборудование, инструмент и материалы: лабораторная вакуумная индукционная печь, технологическая оснастка для получения образцов, отрезной станок, установка для приготовления шлифов, портативный лазерный спектрометр, металлографический микроскоп, твердомер.

Стальной и чугунный лом, ферросплавы, электродный бой, раскислители, формы для заливки образцов, кварцевый песок, жидкое стекло, уголекислота.

Введение

НТП в различных областях техники резко повышает требования к качеству потребляемой металлопродукции, что вызвано необходимостью разработки процессов и оборудования, обеспечивающих производство особо чистых металлических материалов, свободных от вредных примесей, неметаллических включений и обладающих заданными механическими свойствами. Эти процессы получили название специальной металлургии.

К ним можно отнести плавку металла и сплавов в вакуумных индукционных печах (ВИП). Под вакуумом понимают любое состояние газовой среды с давлением ниже атмосферного. Различают низкий, средний и высокий (глубокий) вакуум. Приблизительно принимают следующие границы давления для воздействия видов вакуума.

Низкий вакуум – от 760 до $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.;

Средний – от $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.;

Высокий – менее 10^{-4} мм рт. ст.

Величина вакуума определяется как требованиями технологического процесса, осуществляемого в печи, так и особенностями работы и конструкции печи. В ВИП используют обычно средний вакуум.

При плавке в вакууме ряд физико-химических процессов имеет специфические особенности, а именно: интенсивно выделяются газы из металла, заметно испаряются как основные компоненты сплава, так и их примеси с высокой упругостью пара. При этом становится возможным глубокое раскисление металла углеродом, восстанавливаются и удаляются неметаллические включения (НВ), идут активные процессы между металлом и футеровкой.

Краткая характеристика физико-химических процессов, протекающих в вакууме

1. Дегазация металла.

Согласно современным представлениям, удаление водорода и азота из металла происходит в следующей последовательности:

– перенос растворенных атомов газа к границе раздела фаз (металл – футеровка, металл – газовая фаза над металлом, металл – газовый пузырь или неметаллическое включение (НВ) в жидком металле);

– адсорбция атомов газа в поверхностном слое;

– переход атомов (рекомбинация) в молекулы;

– десорбция молекул газа.

– отвод молекул газа от поверхности металла и удаление из печи в результате работы вакуумных насосов.

Азот имеет более низкий коэффициент диффузии, чем водород, в результате чего он удаляется при вакуумной плавке значительно труднее, чем водород.

2. Испарение компонентов жидкого металла.

Испарение компонентов зависит от свойств самого компонентов, в т. ч. от упругости пара и скорости испарения при данных значениях температуры и от давления газовой фазы над расплавом. Наиболее высокой упругостью пара в условиях плавки в вакууме обладают такие основные компоненты как Mn и, в меньшей степени, Cr и Si.

Из примесей известных металлов наиболее благоприятные условия для удаления испарением имеют Sn и Cu. Заметные потери хрома путем испарения наблюдаются при повышенном его содержании. Mo, W не испаряются в жидкой стали. Потери этих элементов могут происходить при повышенном содержании в стали кислорода. Окислы Mo и W весьма летучи. Ti и Al также испаряются при вакуумной плавке, но весьма легко окисляются. При этом окислы этих элементов всплывают на поверхность ванны и содержание Ti и Al в металле заметно снижается.

3. Особенности раскисления металла.

Наиболее благоприятные условия для раскисления металла в вакууме создаются в том случае, когда продукты раскисления образуются в виде газа, как это происходит при раскислении углеродом. В этом случае продукты раскисления непрерывно удаляются из объема печи и по термодинамическим соотношениям раскисление может быть весьма полным.

Однако в действительности уже при остаточном давлении 0,1 атм. раскислительная способность углерода резко падает и даже при снижении давления до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. содержание кислорода в стали заметно не уменьшается. Объясняется это тем, что в газовых пузырьках CO, которые образуются на шероховатых поверхностях футеровки, гораздо более высокое парциальное давление CO, чем в газовой фазе печи. В результате этого затрудняется переход CO в объем пузырьков.

Дальнейшее раскисление стали может быть выполнено введением Al и Ce. При раскислении Al количество кислорода снижается до 0,002–0,003 % для Fe-C и до 0,004–0,005 % для Fe-Cr сплавов. Еще меньше содержание при раскислении Al и Ce.

Введение в сталь Si и Mn практически не изменяет содержание в ней кислорода.

4. Восстановление и удаление неметаллических включений.

Термодинамические расчеты показывают, что в условиях вакуума углерод, находящийся в расплаве, способен восстанавливать Mn и Cr из оксидов (MnO , Cr_2O_3) и в меньшей степени Si из SiO_2 .

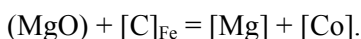
В первую очередь при этом уменьшается количество крупных НМВ (неметаллических включений). Для возможности восстанов-

ления тугоплавких окислов таких элементов как Ti, Al, В, Се плавку ведут при повышенной температуре. Уменьшение количества НМВ (неметаллических включений) объясняется не только более успешным восстановлением, усиленным всплыванием их вместе с пузырьками газа СО, но и самостоятельно, в результате снижения вязкости металла и его перемешивания.

5. Диссоциация компонентов огнеупорной футеровки и ее взаимодействие с жидким металлом.

При вакуумной плавке металла происходит разрушение футеровки в результате механического воздействия жидкого металла, диссоциации в вакууме некоторых компонентов и восстановление некоторых компонентов футеровки при химическом взаимодействии с элементами, находящимися в составе металла.

К увеличению потерь приводит повышенное содержание SiO₂ в материалах. Из-за недостаточной стойкости SiO₂ в условиях вакуума кислая футеровка в таких плавильных печах не применяется. Наиболее часто в индукционных вакуумных печах используют магнетитовую футеровку. В этом случае при плавке чистого железа содержание кислорода в металле при неизменной температуре будет увеличиваться в большей степени, чем ниже остаточное давление и чем длительнее выдержка. Если в жидком металле содержится углерод, то между MgO и углеродом идет восстановительный процесс по реакции:



Взаимодействие между углеродом и компонентами футеровки происходит и в том случае, когда она выполнена преимущественно из Al₂O₃.

Химическое взаимодействие металла с компонентами футеровки усиливается при повышенном содержании в металле Cr, Al и других активных элементов.

Лабораторная индукционная вакуумная печь периодического действия

Лабораторные индукционные вакуумные печи выполняют с одной вакуумной камерой, в которой после откачки воздуха проводят

плавку и разливку металла в изложницы или форму. После этого печь разгерметизируют с целью удаления изложницы со слитком, ревизии и ремонта тигля, загрузки очередной порции шихты, для чего снимают или отводят в сторону крышку или корпус. На рис. 9.1 приведена схема лабораторной индукционной вакуумной печи.

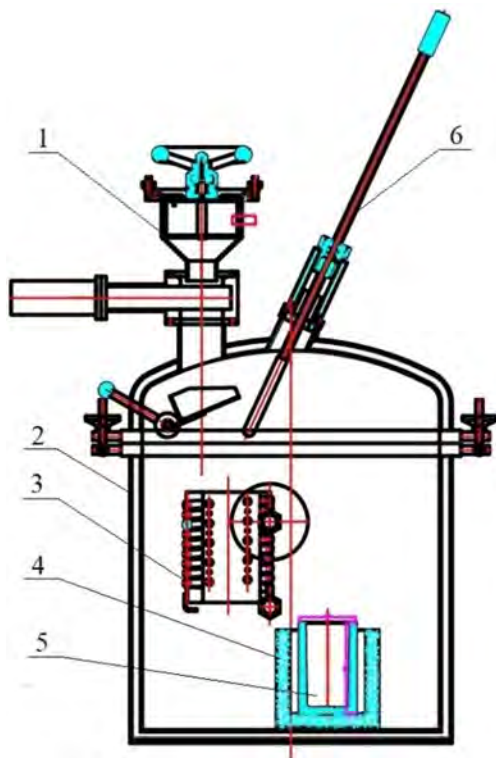


Рис. 9.1. Схема лабораторной индукционной вакуумной печи:
1 – загрузочная камера (шлюз); 2 – корпус печи; 3 – индуктор; 4 – муфельная печь для подогрева литейной формы; 5 – литейная форма; 6 – термопара

Преимуществом плавки в индукционных вакуумных печах является глубокая дегазация металла, успешное удаление примесей ряда цветных металлов и возможность выплавки сталей и сплавов практически любого состава. Наиболее существенные недостатки этих печей – это взаимодействие металла с футеровкой печи, большие

размеры и высокая стоимость установки, худшие ТЭП по сравнению с обычными индукционными печами.

Недостатком также является низкая стойкость футеровки, обычно составляющая несколько десятков плавов, несмотря на то, что она выполняется из чистых электроплавильных огнеупорных материалов (MgO , Al_2O_3) или их смеси. Плавку можно вести как на твердой шихте, так и на жидкой. Более распространен 1-й способ (твердая шихта). Второй способ используют при получении стали в крупных печах, причем в качестве исходного используют жидкий металл из обычной духовой печи.

Полный цикл плавки в ВИП состоит из следующих периодов и операций:

1. Загрузка шихты в печь.
2. Откачка из печи воздуха до рабочего давления (для печи периодического действия).
3. Расплавление шихты.
4. Выдержка (рафинирование, раскисление, легирование).
5. Выпуск и разливка металла.
6. Очистка внутренней поверхности футеровки и подготовка печи к следующей плавке.

Основное время затрачивается на расплавление шихты и выдержку металла. Так, для печи емкостью 0,5 т из общей продолжительности плавки 3 ч 30 мин около 2 ч 30 мин занимает само расплавление шихты и около 40 мин – выдержка.

Перед началом внутренность печи тщательно очищают, футеровку печи ремонтируют или заменяют, внутренние стенки кожуха и смотровые окна промывают бензином или спиртом. Проверяют состояние уплотнений и систему охлаждения и подают воду в узел печи к вакуумным насосам.

В качестве шихты используют набор соответствующих материалов или шихтовую заготовку требуемого состава.

Шихтовые материалы должны быть прокаленными, чистыми по содержанию примесей, с тщательно очищенной поверхностью.

В шихте обычно используют мягкое железо, металлический Cr, электролитический Ni, Co, а также FeMo, FeW и др. После расплавления эти материалы не создают шлак. После загрузки шихты включают вакуумные насосы и затем питающий генератор, сначала при повышенной мощности. Обычно во время расплавления шихты дав-

ление в печи составляет 10^{-1} – 10^{-2} мм рт. ст. Если при расплавлении наблюдается сильное кипение, то рекомендуется проводить его в атмосфере аргона при давлении 40–60 мм рт. ст. После прекращения кипения давление в печи снижают до 10^2 – 10^{-3} мм рт. ст. При этом давлении ведут нагрев и осуществляют выдержку металла до удаления растворенных газов, СО и примесей цветных металлов, а также раскисления и легирования.

Помимо шихтовых материалов, перечисленных выше, по ходу плавки в случае необходимости вводят в конце плавления FeNb, углерод (для раскисления), в начале выдержки – FeV, FeTi, Al (для легирования) FeTi. В конце выдержки добавляют FeMn, FeSi, FeB; перед выпуском – SiCa, Al (для раскисления) и в виде лигатур и сплавов Mg, Ba, Ce.

При загрузке легкоиспаряющихся материалов в печь вводят аргон при давлении 40–100 мм рт. ст. Как указывалось выше, теоретические расчеты показывают, что раскисление углеродом в вакууме может привести к очень низкому содержанию кислорода в металле, однако на практике редко удается уменьшить содержание кислорода ниже 0,006–0,008 % даже при длительной выдержке. Более полное раскисление получается в случае применения сильных металлических раскислителей (это обычно Al в количестве 1 кг на тонну стали).

Дегазация металла при достаточной выдержке и надлежащем вакууме протекает весьма успешно. Водород удаляется почти полностью, а азот в конце плавки может иметь концентрацию 0,003–0,006 %. Однако, при наличии нитридообразующих элементов удаление азота связано со значительными трудностями.

Для удаления азота применяют продувку металла аргоном при его давлении над металлом 5–10 мм рт. ст.

В процессе плавки испаряются примеси цветных металлов, имеющих высокую упругость пара в вакууме и не растворяющиеся в жидком металле. Это прежде всего Zn, Pb, Bi. Удаляются также Cu, Sb и в меньшей степени Sn и As (мышьяк).

При плавке значительно снижается содержание неметаллических включений всех типов, особенно при продувке жидкого сплава аргоном. Установлено, что при выплавке легированных сталей и сплавов сера в вакууме не испаряется.

Применение основных шлаков для удаления серы и неметаллических включений дает положительный результат, однако при работе со шлаком возникает ряд затруднений. Например, в отношении ее удаления перед выпуском металла, поддержания нужного состава шлака во время плавки.

Таблица 9.1

Механические свойства сплава, выплавленного в вакуумной и обычной индукционной печах

| Способ индукционной плавки | Механические свойства стали | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|------------------|--------------|------------|------------------------|----|
| | σ_b , МПа | σ_s , МПа | δ , % | Ψ , % | КС, кДж/м ² | НВ |
| Плавка в вакууме | | | | | | |
| Плавка в атмосфере воздуха | | | | | | |

Таблица 9.2

Химический состав сплава, выплавленного в вакуумной и обычной индукционной печах

| Способ индукционной плавки | Химический состав сплава, % | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|---------|----------|------|--------|------------|
| | углерод | кремний | марганец | сера | фосфор | легирующие |
| Плавка в вакууме | | | | | | |
| Плавка в атмосфере воздуха | | | | | | |

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе на ВИП.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы лабораторной вакуумной индукционной печи.

3. Подобрать шихтовые материалы, лигатуры и раскислители. Произвести расчет шихты на плавку заданной марки сплава.

4. Произвести плавку сплава по двум вариантам (в вакууме и в атмосфере воздуха) и отлить образцы.

5. Исследовать химический состав, микроструктуру и механические свойства полученных сплавов. Результаты исследований занести в табл. 9.1, 9.2.

Содержание работы

1. Краткие сведения о сущности вакуумной индукционной плавки ее преимуществах.

2. Описание конструкции и принципа работы лабораторной вакуумной индукционной печи.

3. Расчет шихты на плавку сплавов по двум вариантам. Сравнительные результаты исследований химического состава, микроструктуры и механических свойств полученных сплавов.

4. Выводы.

Список использованных источников

1. Литейное производство: учебник / В. В. Бауман [и др.]; под ред. А. М. Михайлова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
2. Титов, Н. Д. Технология литейного производства / Н. Д. Титов, Ю. А. Степанов. – М.: Машиностроение, 1985.
3. Худокормов, Д. Н. Производство отливок из чугуна / Д. Н. Худокормов. – Минск, 1987. – 210 с.
4. Ващенко, К. И. Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок / К. И. Ващенко, В. С. Шумихин. – Киев: Виша школа, 1992. – 245 с.
5. Справочник по чугунному литью / под ред. Н. Г. Гиршовича. – Ленинград: Машиностроение, 1978. – 757 с.
6. Электрически печи литейных цехов для выплавки черных и цветных сплавов / Л. М. Романов [и др.]. – М.: МГИУ, 2005. – 104 с.
7. Комаров, О. С. Формирование структуры чугунных отливок / О. С. Комаров. – Минск: Наука и техника, 1977. – 221 с.
8. Худокормов, Д. Н. Роль примесей в процессе графитизации чугунов / Д. Н. Худокормов. – Минск: Наука и техника, 1968. – 152 с.
9. Экономное легирование железоуглеродистых сплавов / С. Н. Леках [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 1996 – 176 с.
10. Романов, Л. М. Литейные сплавы и плавка. Производство отливок из чугуна и стали / Л. М. Романов, А. Н. Болдин. – М.: МГИУ, 2005. – 48 с.
11. Слуцкий, А. Г. Методические указания к лабораторным работам «Производство отливок из чугуна» / А. Г. Слуцкий. – Минск, 2009. – 40 с.
12. Ефимов, В. А. Специальные способы литья. Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
13. Курдюмов, А. В. Лабораторные работы по технологии литейного производства / А. В. Курдюмов. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
14. Ветишка, А. Теоретические основы литейной технологии / А. Ветишка [и др.]. – Киев: Виша школа, 1981. – 320 с.
15. Степанов, Ю. А. Технология литейного производства. Специальные виды литья / Ю. А. Степанов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 287 с.

16. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / сост. Э. В. Захарченко [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
17. Справочник по чугунному литью / под ред. Н. Г. Гиршовича. – М.: Машгиз, 1961. – 800 с.
18. Гелин, Ф. Д. Металлические материалы. Справочник / Ф. Д. Гелин. – Минск: Высшая школа, 1987. – 368 с.

Учебное издание

**ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

Пособие
к лабораторным работам для студентов специальности 1-42 01 01
«Металлургическое производство и материалобработка
(по направлениям)»

Составители:
СЛУЦКИЙ Анатолий Григорьевич
КУЛИНИЧ Игорь Леонидович

Редактор *А. Д. Спичёнок*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 27.09.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,41. Уч.-изд. л. 4,23. Тираж 100. Заказ 301.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.