

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Металлургия черных и цветных сплавов»

## ОБЩАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Лабораторный практикум  
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  
2018

УДК 669.18.046.5 (076.5)

ББК 34.3я7

О-28

Составители:

*Б. М. Неменёнок, Г. А. Румянцева*

Рецензенты:

кафедра «Материаловедение и технология металлов»  
УО «Белорусский государственный технологический университет»  
(зав. кафедрой – кандидат технических наук, доцент *Д. В. Куис*);  
кандидат технических наук, доцент *М. А. Садох*

**Общая** металлургия : лабораторный практикум для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материаловедение (по направлениям)» / сост.: Б. М. Неменёнок, Г. А. Румянцева. – Минск: БНТУ, 2018. – 45 с.

ISBN 978-985-550-809-1.

Лабораторный практикум предназначен для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении курса, а также для приобретения практических навыков по расчету шихты для доменной плавки чугуна, подготовки материалов, а также для более глубокого изучения физико-химических процессов, протекающих в плавильных агрегатах.

УДК 669.18.046.5 (076.5)

ББК 34.3я7

ISBN 978-985-550-809-1

© Белорусский национальный  
технический университет, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум включает в себя семь лабораторных работ по всем разделам курса «Общая металлургия» для специальности 1-42 01 01 дневной и заочной форм обучения. Целью лабораторных работ является закрепление теоретического материала курса, а также ознакомление студентов с методиками исследований физико-химических процессов, протекающих при металлургических переделах. Большое внимание уделяется приобретению студентами навыков ведения самостоятельной научно-исследовательской работы, правильного анализа и обобщения полученных результатов.

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

Перед началом выполнения работ студенты получают инструктаж по охране труда и технике безопасности и расписываются в соответствующем журнале.

Студенты, пропустившие лабораторную работу, выполняют ее в конце учебного 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 соблюдать следующие требования:

1. Лабораторные работы проводятся по подгруппам от 12 до 15 человек.

2. Перед выполнением лабораторных работ студенты обязаны ознакомиться с правилами охраны труда и противопожарной безопасности 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 или 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, владеющие правилами и порядком их выполнения.

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

## Лабораторная работа № 1

### ИЗУЧЕНИЕ СЫРЫХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБОВ ИХ ПОДГОТОВКИ К ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

**Цель работы:** изучение коллекции сырых материалов полезных ископаемых и способов их подготовки к доменной плавке.

**Оборудование и материалы:** коллекция сырых материалов, установка для агломерации руд, электропечь сопротивления, термопара, потенциометр, железная руда, кокс, известняк.

#### Теоретическая часть

В коллекции содержатся различные виды железных руд.

Руды, содержащие в основном гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), называются красными железняками или гематитовыми рудами.



Рис. 1.1. Красный железняк

Цвет красных железняков колеблется от красного до светло-серого и даже черного, однако на фарфоровой пластинке они всегда оставляют красную черту. Содержание железа в этих рудах от 50 до 70 %. Красные железняки, содержащие 40–50 % железа при большом количестве в пустой породе кремнезема (до 30–40 %), называются кварцитами. К наиболее крупным месторождениям красных железняков относятся: Криворожское, Курская магнитная аномалия, Атасуйское (Казахстан), Ангаро-Питское (Восточная Сибирь).

Железные руды, содержащие в основном водный оксид железа, главным образом лимонит  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , называются бурыми железняками.



Рис. 1.2. Бурый железняк

Эти руды чаще всего рыхлые, пылевидные и содержат много фосфора и мышьяка. Цвет бурых железняков обычно бурый или желтый. Содержание железа от 25 до 50 %. Наиболее крупные месторождения в странах СНГ: Керченское, Лисаковское, Аятское (Казахстан).

Руды, содержащие в основном  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , называются магнитными железняками или магнетитовой рудой.



Рис. 1.3. Магнитный железняк

Магнетит – это сложный оксид железа  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , содержащий 30 %  $\text{FeO}$  и 70 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Магнитные железняки часто загрязнены серой (до 6 %). Представлены они преимущественно крепкими плотными кусковыми рудами с мелкокристаллическим строением и содержат от 50 до 60 % железа.

Цвет руд – блестящий, черно-синий. Наиболее крупные месторождения магнитных железняков в странах СНГ: Магнитогорское, Качканарское (Урал), Соколовско-Сарбайское, Коршунское (Восточная Сибирь).

Страны СНГ являются крупнейшими обладателями запасов железных руд (48 % мировых запасов).

В коллекции имеются марганцевые руды, служащие для производства чугуна и ферромарганца; каолин и бокситы, являющиеся сырьем для производства алюминия. В коллекции содержатся каменный и бурый угли и продукт переработки каменных углей – кокс. Флюсы представлены различными сортами известняка, бокситом, плавиковым шпатом и кварцевым песком.

В настоящее время большинство железных руд подвергается обогащению. В результате обогащения содержание извлекаемого металла в концентрате увеличивается. Обогащению подвергаются предварительно измельченные руды, что позволяет полнее отделять минералы от пустой породы. Однако переработка тонкоизмельченных концентратов и мелких пылевидных руд в доменной печи сопряжена со значительными трудностями, так как при этом наблюдается значительный вынос рудной пыли и нарушается нормальный ход доменного процесса. Поэтому концентраты и пылевидные руды подвергают окускованию, которое производится способами брикетирования, агломерации и окатывания.

Агломерация – процесс превращения мелких материалов в прочные пористые куски. Он осуществляется при нагреве до температур, близких к температурам плавления. Образующаяся жидкая фаза связывает зерна руды в куски неправильной формы. При агломерации железных руд жидкая фаза образуется в виде силикатов железа.

Практически агломерация железных руд осуществляется следующим образом. Увлажненная смесь руды и измельченного кокса с добавкой других материалов подогрывается до

температуры воспламенения кокса. При горении кокс развивает температуру, достаточную для образования жидких фаз. Вследствие создаваемого разрежения под слоем шихты через нее все время просасывается воздух. Различные руды поддаются агломерации по-разному. Хорошо агломерируются магнитные железняки, хуже – богатые красные железняки. Это объясняется тем, что в первом случае условия для образования расплавленных силикатов железа более благоприятные.



В случае агломерации красных железняков образование силикатных масс затруднено, так как в этом случае  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  не вступают непосредственно в реакцию. Для этого необходимо предварительное восстановление  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . В последние годы преимущественно получают офлюсованный агломерат.

Прочность и пористость агломерата, необходимые для его хорошей восстановимости, зависят от правильной шихтовки, увлажнения массы и свойств руды. Изучение особенностей процесса агломерации руд различных составов в разных условиях производится на лабораторной установке, которая состоит из металлической чаши, имеющей дно с малыми отверстиями и соединенной трубкой с большим металлическим резервуаром. Резервуар соединен с насосом, откачивающим воздух. На соединительном трубопроводе установлен кран.

Схема процесса агломерации представлена на рис. 1.4.

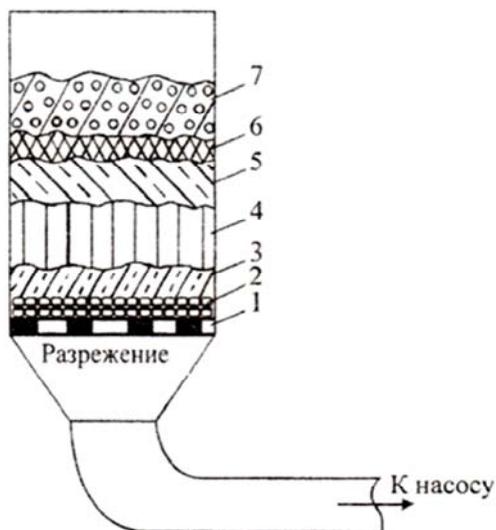


Рис. 1.4. Схема процесса агломерации:  
 1 – колосниковая решетка; 2 – постель; 3 – зона переувлажнения;  
 4 – зона сушки; 5 – зона подогрева; 6 – зона горения;  
 7 – готовый агломерат

### Порядок выполнения работы

1. Навеску железной руды, тщательно смешанную с коксом, увлажнить, загрузить в чашу. Максимальная крупность кокса составляет 3–6 мм, железной руды – 6–8 мм. Оптимальная влажность шихты – 6–9 %. Количество кокса составляет 5–6 % от массы увлажненной руды.

2. Создать разрежение с помощью насоса и сквозь слой шихтовых материалов пропустить воздух. Шихту подогреть до температуры воспламенения кокса при непрерывном просасывании воздуха. После выгорания угля, которое определяется по цвету отсасываемого воздуха, дать агломерату остыть и извлечь его из чаши. Опыт повторить 2–3 раза для каждого состава. Качество агломерата определить путем разрушения полученного продукта на испытательной машине.

## Содержание отчета

1. Дать краткую характеристику трех групп сырых материалов доменной плавки.
2. Назвать основные месторождения железных руд СНГ.
3. Привести схему установки для агломерации железных руд, ее описание и порядок работы.
4. Записать составы смесей для агломерации и дать качественную характеристику полученного агломерата.
5. Отметить основные процессы, протекающие при спекании железных руд на колосниковой решетке.
6. Привести общие выводы по работе.

## Лабораторная работа № 2

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА И ШЛАКОВАНИЕ ПУСТОЙ ПОРОДЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Цель работы:** определение с помощью термического анализа температуры начала восстановления оксидов железа углеродом и изучение особенностей процессов шлакования оксидов железа пустой породой.

**Оборудование и материалы:** силитовая печь, установка для термического анализа, потенциометр, нуль-гальванометр, термопары ХА и ПП, оксиды железа и алюминия, кварцевый песок, порошок графита, алундовые тигли.

### Теоретическая часть

Восстановление железа из его оксидов является основной целью доменного процесса и протекает как за счет газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ), так и за счет углерода кокса. Восстановление идет сту-

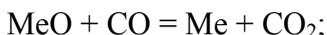
пенчато, от высших оксидов к низшим, например с участием оксида углерода, по реакциям:



При температурах ниже  $570^\circ\text{C}$  закись железа неустойчива, и железо восстанавливается непосредственно из  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  по реакции:



Восстановление оксидов железа углеродом принято называть прямым восстановлением, а газами – косвенным. Прямое восстановление понимают шире, чем непосредственное взаимодействие углерода с оксидами. Фактически процесс связан с газовой фазой и состоит из двух стадий: косвенного восстановления и реакции взаимодействия  $\text{CO}_2$  с углеродом.



Упругость диссоциации оксида железа очень велика: при температуре  $1350^\circ\text{C}$  она достигает 60 мм, а при температуре  $1430^\circ\text{C}$  – 70 мм рт. ст. При нагревании на воздухе при температуре  $1350^\circ\text{C}$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$  начинает быстро терять свой кислород, а при температуре  $1430^\circ\text{C}$  – быстро разлагается с образованием  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Магнитный оксид железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – промежуточный оксид, его можно представить в виде  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Для доменной плавки важное значение имеет характер взаимодействия оксидов железа с кремнеземом пустой породы. Оксид железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с кремнекислотой соединений не дает. Магнитный оксид железа частично вступает в соединение с  $\text{SiO}_2$ :



Основной оксид железа  $\text{FeO}$  легко вступает в соединение с кремнеземом пустой породы, образуя силикаты железа:  $(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$  – фаялит, и  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  – грюнерит.

Температура плавления фаялита –  $1205^\circ\text{C}$ . Его можно легко получить синтетически. Шлакование оксида железа кремнеземом тесно связано с составом газовой фазы. При нагревании в атмосфере воздуха смеси  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  до температуры  $1350^\circ\text{C}$  никаких изменений не происходит. При температуре  $1350^\circ\text{C}$  упругость диссоциации оксида железа становится равной парциальному давлению кислорода в воздухе, и происходит медленное разложение оксида железа с образованием  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

В случае нагревания смеси  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  в восстановительной атмосфере оксид железа легко восстанавливается до  $\text{FeO}$  и образует с  $\text{SiO}_2$  силикаты железа.

При определенных соотношениях  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  вся масса при температуре  $1170^\circ\text{C}$  может перейти в расплавленное состояние. В условиях восстановительной атмосферы можно достичь восстановления оксидов железа при температурах ниже  $1170^\circ\text{C}$ . В этом случае расплавленная масса силикатов железа получиться не может, а образуется смесь двух твердых веществ –  $\text{Fe}$  и  $\text{SiO}_2$ .

Для определения температуры начала восстановления оксидов железа углеродом используется установка термического анализа (рис. 2.1), состоящая из электрической печи 1 для нагрева веществ, находящихся в тигле 2. Тигель разделен на две половины перегородкой. В одну половину тигля насыпается порошок эталонного вещества ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), не испытывающего при нагрева-

нии никаких превращений, сопровождаемых тепловыми эффектами. В другую половину тигля насыпается смесь порошков  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и С. В центр каждой половины тигля помещаются термопары 3 и 4. Они соединяются дифференциально и подключаются к нуль-гальванометру 5. Термопара, находящаяся в исследуемом веществе, соединяется с гальванометром 6, который регистрирует температуру. Печь нагревают со скоростью  $10\text{--}13\text{ }^\circ\text{C}$  в минуту до  $700\text{ }^\circ\text{C}$  и  $8\text{--}10\text{ }^\circ\text{C}$  в минуту – от  $700$  до  $900\text{ }^\circ\text{C}$ . Ход нагревания вещества фиксируется записью показаний температуры и нуль-гальванометра через 1 минуту.

До начала процесса восстановления оксидов железа углеродом температура эталонного вещества и исследуемой навески одинакова. Нуль-гальванометр показывает отсутствие тока в дифференциальной цепи. Восстановление оксидов железа протекает с выделением теплоты. Это приводит к нарушению равенства температур в половинках тигля и вызывает появление тока в дифференциальной цепи, что регистрируется нуль-гальванометром. Температура, соответствующая появлению тока в дифференциальной цепи, будет температурой начала восстановления оксидов железа углеродом.

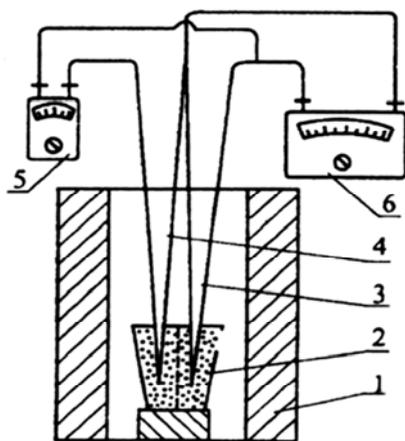


Рис. 2.1. Схема установки для термического анализа

## Порядок выполнения работы

1. Разогреть силитовую печь до температуры 1200–1300 °С и поместить в нее на 30–40 мин алундовые тигли с навесками смесей:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{C}$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C}$ . Извлечь тигли из печи, охладить их и описать изменения, которые произошли с материалами, заполнив табл. 2.1.

Таблица 2.1

### Результаты наблюдений

| $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{C}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C}$ |
|--|---|------------------------------------|
|  |   |                                    |

2. Подготовить навески  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по 30 г и поместить их в разные половинки тигля установки для термического анализа. Опустить хромель-алюмелевые термопары (ТХА) в эталонное и исследуемое вещество и включить печь. Записывать показания температуры и нуль-гальванометра каждую минуту.

3. Результаты наблюдений занести в табл. 2.2 и по полученным данным построить зависимость изменения температуры и показаний нуль-гальванометра от времени.

Таблица 2.2

### Результаты измерений

| $\tau$ , мин | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t$ , °С     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $E$ , мВ     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

## Содержание отчета

1. Привести описание и схему установки для термического анализа, таблицы экспериментальных данных и графические зависимости.
2. Объяснить полученные результаты по шлакованию оксидов железа кремнеземом и сделать выводы по работе.

### Лабораторная работа № 3

## РАСЧЕТ ШИХТЫ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ ПЕРЕДЕЛЬНОГО ЧУГУНА

**Цель работы:** изучение упрощенного метода расчета шихты для доменной плавки.

### Теоретическая часть

Состав шихты рассчитывают для определения нужного соотношения между материалами для того, чтобы получить чугуны и шлак заданного состава. В шихту современной доменной печи, как правило, входит агломерат, окатыши, некоторое количество богатой кусковой железной, марганцевой руды, известняк, кокс и конвертерный шлак.

Существует несколько методов расчета шихты. Все они в применении к реальному доменному процессу сложны и трудоемки. Предлагаемый расчет исходит из некоторых упрощений:

1. Железосодержащая часть шихты имеет усредненный состав без деления на компоненты.
2. Расчет расхода кокса производится по формулам без использования теплового баланса плавки.
3. Не рассчитывается состав и количество колошниково-го газа.

В задачу расчета шихты входит:

1. Определение необходимого количества железорудной смеси и марганцевой руды для выплавки единицы чугуна.
  2. Установление необходимого расхода флюса для ошлакования пустой породы.
  3. Определение состава и количества образующегося шлака.
- Расчет и состав шлака по химическому составу, физическим свойствам и количеству должен способствовать восстановлению полезных элементов в чугуне и удалению серы в шлак.

### Данные для расчета шихты

1. Состав передельного чугуна и химический состав кокса представлены в табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

### Состав передельного чугуна

| Вариант | Содержание элементов, % |      |      |      |      |       |        |
|---------|-------------------------|------|------|------|------|-------|--------|
|         | Si                      | Mn   | S    | P    | C    | Fe    | Σ      |
| Пример  | 0,80                    | 0,30 | 0,05 | 0,20 | 4,00 | 94,65 | 100,00 |
| 1       | 0,75                    | 0,30 | 0,03 | 0,15 | 4,15 | 94,62 | 100,00 |
| 2       | 0,90                    | 0,40 | 0,04 | 0,13 | 4,20 | 94,33 | 100,00 |
| 3       | 0,85                    | 0,50 | 0,05 | 0,20 | 4,00 | 94,40 | 100,00 |
| 4       | 1,00                    | 0,60 | 0,03 | 0,15 | 4,20 | 94,02 | 100,00 |
| 5       | 1,05                    | 0,70 | 0,05 | 0,15 | 4,40 | 93,65 | 100,00 |
| 6       | 0,60                    | 0,80 | 0,04 | 0,13 | 4,50 | 93,93 | 100,00 |
| 7       | 0,65                    | 0,90 | 0,06 | 0,20 | 4,60 | 93,59 | 100,00 |
| 8       | 0,70                    | 1,00 | 0,03 | 0,17 | 4,70 | 93,40 | 100,00 |
| 9       | 0,75                    | 0,95 | 0,03 | 0,18 | 4,80 | 93,29 | 100,00 |
| 10      | 1,10                    | 0,35 | 0,05 | 0,16 | 4,13 | 94,21 | 100,00 |
| 11      | 1,15                    | 0,45 | 0,07 | 0,19 | 4,18 | 93,96 | 100,00 |
| 12      | 1,20                    | 0,55 | 0,04 | 0,11 | 4,55 | 93,55 | 100,00 |
| 13      | 0,50                    | 0,65 | 0,06 | 0,14 | 4,75 | 93,90 | 100,00 |
| 14      | 0,95                    | 0,75 | 0,04 | 0,15 | 4,35 | 93,76 | 100,00 |

Таблица 3.2

## Химический состав кокса

| Вариант | Содержание, % |      |         |         |        |
|---------|---------------|------|---------|---------|--------|
|         | зола          | сера | летучие | углерод | Σ      |
| Пример  | 10,10         | 0,70 | 0,90    | 88,30   | 100,00 |
| 1       | 10,00         | 0,80 | 0,70    | 88,50   | 100,00 |
| 2       | 8,50          | 0,60 | 0,80    | 90,10   | 100,00 |
| 3       | 12,00         | 0,90 | 0,60    | 86,50   | 100,00 |
| 4       | 13,00         | 0,50 | 1,10    | 85,40   | 100,00 |
| 5       | 9,00          | 1,00 | 1,20    | 88,80   | 100,00 |
| 6       | 9,50          | 1,10 | 1,30    | 88,10   | 100,00 |
| 7       | 12,50         | 1,20 | 1,40    | 84,90   | 100,00 |
| 8       | 11,00         | 1,30 | 1,50    | 86,20   | 100,00 |
| 9       | 8,00          | 1,40 | 0,90    | 89,7    | 100,00 |
| 10      | 10,80         | 1,50 | 1,00    | 86,70   | 100,00 |
| 11      | 10,30         | 1,05 | 0,75    | 87,90   | 100,00 |
| 12      | 10,90         | 1,60 | 0,85    | 86,65   | 100,00 |
| 13      | 11,20         | 1,70 | 0,95    | 86,15   | 100,00 |
| 14      | 8,70          | 1,15 | 0,85    | 89,30   | 100,00 |

2. Расход сухого кокса составляет 600 кг на 1 т выплавляемого чугуна.

3. Основность шлака (соотношение общего содержания извести в шлаке к кремнезему):

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,2.$$

4. В чугун переходит 99,5 % железа и 50 % марганца. В шлак переходит 0,5 % железа и 50 % марганца. Вместе с газами улетучивается 10 % серы. От оставшейся в печи серы 95 % переходит в шлак, 5 % – в чугун.

5. Химический состав шихтовых материалов и топлива приведен в табл. 3.3.

## Химический состав шихтовых материалов и топлива

| Материал                                | Содержание составляющих, % |        |       |       |                  |                                |        |       |       |       |  |
|---|----------------------------|--------|-------|-------|------------------|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|--|
|   | Fe <sub>общ</sub>          | Mn     | P     | S     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    | MgO   | MnO   | FeS   |  |
| Офлюсованный агломерат                  | 49,300                     | 0,540  | 0,034 | 0,060 | 9,500            | 2,450                          | 16,400 | 2,300 | 1,370 | 0,170 |  |
| Руда криворожская                       | 56,800                     | 0,070  | 0,100 | –     | 16,600           | 0,990                          | 0,230  | 0,150 | 0,090 | –     |  |
| Железорудная смесь                      | 50,050                     | 0,493  | 0,040 | 0,050 | 10,210           | 2,300                          | 14,780 | 2,080 | 1,240 | 0,150 |  |
| Марганцевая руда                        | 3,130                      | 32,900 | 0,140 | 0,040 | 42,150           | 5,080                          | 5,270  | 1,210 | –     | 0,080 |  |
| Конвертерный шлак (30 кг на 1 т чугуна) | 17,200                     | 0,720  | 0,150 | 0,050 | 19,770           | 6,300                          | 38,300 | 3,500 | 9,500 | 0,030 |  |
| Известняк                               | 0,120                      | –      | 0,008 | 0,040 | 0,900            | 0,140                          | 54,480 | 0,540 | –     | –     |  |
| Окатыши (300 кг на 1 т)                 | 62,500                     | 0,150  | 0,010 | 0,050 | 18,500           | 0,900                          | 4,500  | 0,800 | 1,050 | –     |  |
| Зола кокса                              | 19,000                     | 0,160  | 0,090 | –     | 38,500           | 24,300                         | 6,700  | 1,560 | 0,200 | –     |  |

## Порядок выполнения расчета

1. Расчет шихты по варианту «Пример» (табл. 3.1 и 3.2).
2. Расчет ведем на 1000 кг чугуна.
3. Определение расхода железорудной смеси и марганцевой руды.

Расход железорудной смеси ( $x$ ) и марганцевой руды ( $y$ ) находим из уравнения баланса железа (а) и марганца (б):

а)

$$\begin{aligned}0,05005 \cdot x + 0,0313 \cdot y + 30 \cdot 0,172 + 300 \cdot 0,625 + \\+ 600 \cdot 0,101 \cdot 0,19 = 946,5 \cdot \frac{100}{99,5}; \\0,5005 \cdot x + 0,0313 \cdot y = 747,082.\end{aligned}$$

б)

$$\begin{aligned}0,00493 \cdot x + 0,329 \cdot y + 30 \cdot 0,0072 + 300 \cdot 0,0015 + \\+ 600 \cdot 0,101 \cdot 0,0016 = 3 \cdot \frac{100}{50}; \\0,00493 \cdot x + 0,329 \cdot y = 5,237.\end{aligned}$$

Решая систему уравнений, находим:

$$x = 1492,1 \text{ кг};$$

$$y = 9,45 \text{ кг}.$$

Следовательно, расход железорудной смеси равен 1492,1 кг, расход марганцевой руды – 9,45 кг.

4. Определяем расход известняка.

Количество кремнезема, вносимого с шихтой, кг:

– железорудной смесью:  $1492,1 \cdot \frac{10,21}{100} = 152,34$  кг;

– марганцевой рудой:  $9,45 \cdot \frac{42,15}{100} = 3,98$  кг;

– конвертерным шлаком:  $30 \cdot \frac{19,77}{100} = 5,93$  кг;

– окатышами:  $300 \cdot \frac{18,5}{100} = 55,5$  кг;

– золой кокса:  $600 \cdot 0,101 \cdot \frac{38,5}{100} = 23,33$  кг.

Всего с шихтой вносится 241,08 кг кремнезема.

Количество извести, вносимой с шихтой, кг:

– железорудной смесью:  $1492,1 \cdot \frac{14,78}{100} = 220,53$  кг;

– марганцевой рудой:  $9,45 \cdot \frac{5,27}{100} = 0,5$  кг;

– конвертерным шлаком:  $30 \cdot \frac{19,77}{100} = 5,93$  кг;

– окатышами:  $300 \cdot \frac{4,5}{100} = 13,5$  кг;

– золой кокса:  $600 \cdot 0,101 \cdot \frac{6,7}{100} = 4,06$  кг.

Всего с шихтой вносится 250,08 кг извести.

В шлак перейдет кремнезема (за вычетом восстановившегося):

$$241,08 - \frac{60}{28} \cdot 8 = 241,08 - 17,14 = 223,94 \text{ кг.}$$

Исходя из заданной основности шлака  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,2$ , в нем должно быть следующее количество CaO:

$$223,94 \cdot 1,2 = 268,73 \text{ кг.}$$

В шихте имеется 250,08 кг CaO. Следовательно, с известняком следует внести CaO:

$$268,73 - 250,08 = 18,65 \text{ кг.}$$

С учетом того, что 1 кг поступающего в шихту известняка содержит 0,5448 кг CaO и 0,009 кг SiO<sub>2</sub>, флюсующая способность известняка составит:

$$0,5448 - 0,009 \cdot 1,2 = 0,534 \text{ кг.}$$

Расход известняка будет равен

$$\frac{18,65}{0,534} = 34,93 \text{ кг.}$$

5. Определение количества оксидов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, вносимых шихтой, кг:

– железорудной смесью:  $1492,1 \cdot \frac{2,30}{100} = 34,32 \text{ кг};$

– марганцевой рудой:  $9,45 \cdot \frac{5,8}{100} = 0,48 \text{ кг};$

– конвертерным шлаком:  $30 \cdot \frac{6,2}{100} = 1,89 \text{ кг};$

– окатышами:  $300 \cdot \frac{0,9}{100} = 2,7 \text{ кг};$

– известняком:  $34,93 \cdot \frac{0,14}{100} = 0,05$  кг;

– золой кокса:  $600 \cdot 0,101 \cdot \frac{24,3}{100} = 14,73$  кг.

Всего с шихтой вносится 54,17 кг  $Al_2O_3$ .

6. Определение количества оксидов MgO, вносимых шихтой, кг:

– железорудной смесью:  $1492,1 \cdot \frac{2,08}{100} = 31,04$  кг;

– марганцевой рудой:  $9,45 \cdot \frac{1,21}{100} = 0,11$  кг;

– конвертерным шлаком:  $30 \cdot \frac{3,5}{100} = 1,05$  кг;

– окатышами:  $300 \cdot \frac{0,8}{100} = 2,4$  кг;

– известняком:  $34,93 \cdot \frac{0,54}{100} = 0,19$  кг;

– золой кокса:  $600 \cdot 0,101 \cdot \frac{1,56}{100} = 0,95$  кг.

Всего с шихтой вносится 35,74 кг MgO.

7. Расчет количества серы, вносимой шихтой, кг:

– железорудной смесью:  $1492,1 \cdot \frac{0,05}{100} = 0,746$  кг;

– марганцевой рудой:  $9,45 \cdot \frac{0,04}{100} = 0,004$  кг;

– конвертерным шлаком:  $30 \cdot \frac{0,05}{100} = 0,015$  кг;

– окатышами:  $300 \cdot \frac{0,05}{100} = 0,15$  кг;

– известняком:  $34,93 \cdot \frac{0,04}{100} = 0,014$  кг;

– коксом:  $600 \cdot \frac{0,7}{100} = 4,2$  кг.

Всего с шихтой вносится 5,13 кг S.

Улетучивается вместе с газами:

$$10 \cdot \frac{5,13}{100} = 0,513 \text{ кг.}$$

Переходит серы в чугун:

$$\frac{(5,13 - 0,513) \cdot 5}{100} = 0,23 \text{ кг.}$$

Переходит серы в шлак:

$$5,13 - 0,513 - 0,23 = 4,39 \text{ кг.}$$

По реакции  $\text{CaO} + \text{S} = \text{CaS} + 0,5\text{O}_2$  потребуется CaO:

$$4,39 \cdot \frac{56}{32} = 7,68 \text{ кг.}$$

При этом образуется CaS:

$$4,39 \cdot \frac{72}{32} = 9,88 \text{ кг.}$$

8. Состав и количество шлака приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

## Состав и количество доменного шлака

| Вещество                       | Количество, кг  | Процентное содержание, % |
|--------------------------------|---|--------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 223,94  | 37,65                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 54,17   | 9,11                     |
| CaO                            | 268,73 – 7,68 = 261,05                                  | 43,89                    |
| MgO                            | 35,74   | 6,01                     |
| MnO                            | $3 \cdot \frac{71}{55} = 3,87$                          | 0,65                     |
| FeO                            | $946,5 \cdot \frac{0,5 \cdot 72}{99,5 \cdot 56} = 6,12$ | 1,03                     |
| CaS                            | 9,88  | 1,66                     |
| ВСЕГО                          | 594,77  | 100                      |

Относительное количество шлака, кг/кг чугуна, будет:

$$\frac{594,77}{1000} = 0,5948.$$

Общее содержание извести в шлаке составит:

$$261,05 + 7,68 = 268,73 \text{ кг.}$$

Проверяем основность полученного шлака:

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = \frac{268,73}{223,94} = 1,2.$$

Основность соответствует заданной.

## Содержание отчета

1. Рассчитать шихту для выплавки передельного чугуна, исходя из заданного состава чугуна и кокса.
2. Сделать выводы по работе.

### Лабораторная работа № 4

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛИТКОВ НА ПРОЗРАЧНОЙ МОДЕЛИ

**Цель работы:** изучение процесса кристаллизации слитков на прозрачной модели и определение скорости затвердевания слитка в зависимости от температуры расплава.

**Оборудование и материалы:** установка для изучения кристаллизации слитков на прозрачной модели; сушильный шкаф; расплав гипосульфита; линейка; термометр.

### Теоретическая часть

В структуре слитка спокойной стали различают следующие структурные зоны, отличающиеся формой кристаллов и их размерами (рис. 4.1): сравнительно тонкую наружную корку, состоящую из мелких равноосных кристалликов; зону вытянутых столбчатых кристаллов; центральную зону крупных неориентированных кристаллов; конус осаждения – мелкозернистую зону у донной части слитка, имеющую конусообразную форму.

Наружная зона образуется после соприкосновения жидкой стали с холодными стенками изложницы. Быстрое переохлаждение металла приводит к образованию большого числа центров кристаллизации и активному росту кристаллов. Высокая скорость кристаллизации не позволяет им вырасти до значи-

тельных размеров и принять определенную ориентацию. Поэтому по периферии слитка образуются мелкие неориентированные кристаллы. Толщина зоны мелких кристаллов невелика и составляет 6–15 мм.

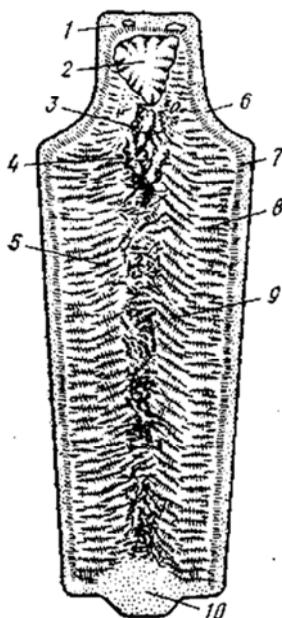


Рис. 4.1. Структура слитка спокойной стали:

- 1 – мост металла над раковинной; 2 – усадочная раковина;  
 3 – усадочные пустоты; 4 – осевая усадочная рыхлость;  
 5 – зона беспорядочно ориентированных равноосных кристаллов;  
 6 – мелкие равноосные кристаллы; 7, 8 – зоны столбчатых кристаллов;  
 9 – столбчатые кристаллы, направленные к тепловому центру;  
 10 – конус осаждения

Зона столбчатых кристаллов образуется в результате уменьшения скорости охлаждения и существенного снижения скорости кристаллизации. Направление их роста определяется направлением отвода теплоты – главные оси кристаллов растут в сторону, противоположную направлению отвода теплоты. Поскольку теплота от каждой кристаллизующейся точки

отводится к стенке изложницы кратчайшим путем, то есть в направлении, нормальном к стенке изложницы, кристаллы оказываются вытянутыми в этом направлении. Протяженность зоны столбчатых кристаллов зависит от интенсивности охлаждения слитка, теплопроводности стали, определяемой ее составом и от содержания водорода в стали.

Центральная зона крупных неориентированных кристаллов возникает вследствие отсутствия определенной направленности отдачи теплоты, что приводит к выравниванию температуры металла в различных точках. Поэтому образующиеся кристаллы не имеют определенной ориентированности и получаются разноосными.

Образование конуса осаждения в нижней части слитка обычно объясняется опусканием на дно изложницы кристаллов, зародившихся в объеме жидкого металла центральной части слитка, а также обломившихся под воздействием потоков жидкого металла непрочных ветвей столбчатых кристаллов. Это осаждение кристаллов происходит в силу разности плотностей затвердевшего и жидкого металла.

Образование здоровой литой структуры стального слитка зависит от многих факторов, среди которых большое значение имеет скорость кристаллизации.

Для определения скорости затвердевания слитка можно применить параболическую зависимость:

$$a = k \cdot \sqrt{\tau},$$

где  $a$  – толщина закристаллизовавшейся корочки металла, мм;  
 $k$  – коэффициент, зависящий от состава стали, температуры нагрева и других факторов;  
 $\tau$  – время, с.

Процесс кристаллизации лучше наблюдать на расплаве гипосульфита, залитого в плексигласовую форму с водяным охлаждением (рис. 4.2).

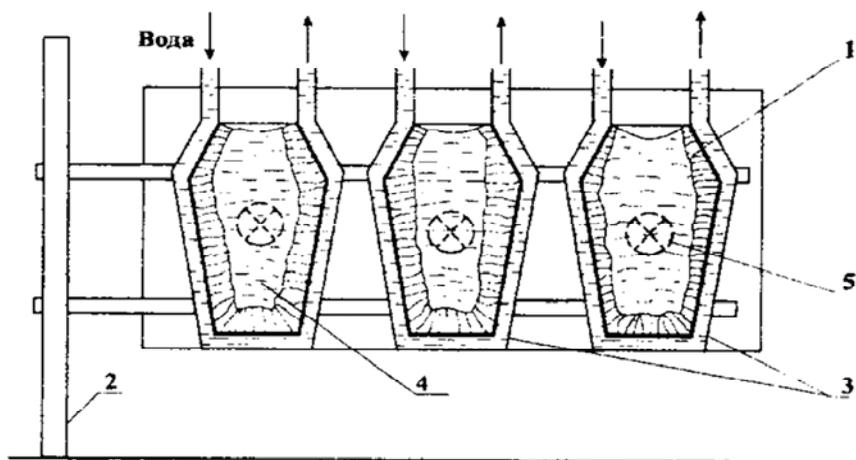


Рис. 4.2. Схема установки для изучения процесса формирования слитка на прозрачной модели

Установка состоит из трех плоских прозрачных изложниц 1, изготовленных из плексигласа. Изложницы закрепляются на штативе 2. К нижним и боковым поверхностям изложницы подводится по медным трубочкам 3 вода для интенсификации охлаждения расплава 4. Для более четкого наблюдения за процессом кристаллизации прозрачная изложница подсвечивается электрическими лампочками 5, установленными со стороны одной из плоских граней.

### Порядок выполнения работы

1. Расплавить гипосульфит в мензурке в сушильном шкафу при температуре 100 °С. Профильтровать его через тканевый фильтр и залить в изложницы расплав при температурах 60, 75 и 90 °С.

2. Во время процесса кристаллизации через 5 мин производить замеры толщины нарастающей корочки на боковой и донной поверхностях изложницы. Результаты занести в табл. 4.1.

3. По результатам измерений построить для различных температур зависимость изменения толщины корочки от времени затвердевания расплава в форме.

Таблица 4.1

Результаты измерений толщины нарастающей кристаллической корки

| Время,<br>мин | 60 °С         |               | 75 °С         |               | 90 °С         |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|               | <i>a</i> , мм | <i>b</i> , мм | <i>a</i> , мм | <i>b</i> , мм | <i>a</i> , мм | <i>b</i> , мм |
|               |               |               |               |               |               |               |

Здесь *a* – толщина корки у боковой стенки изложницы, мм;  
*b* – толщина корки у донной части слитка, мм.

**Содержание отчета**

1. Привести описание и схему процесса формирования слитка в зависимости от температуры заливки расплава с соответствующими пояснениями, таблицу с результатами измерений.
2. Представить в виде графиков результаты измерения скорости затвердевания слитка в зависимости от температуры заливки. Обобщить полученные результаты и сделать выводы.

## Лабораторная работа № 5

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ СТАЛИ В ИЗЛОЖНИЦЫ

**Цель работы:** практическое ознакомление с влиянием некоторых факторов технологии разлива стали на расположение усадочной раковины.

**Оборудование и материалы:** сушильный шкаф; кварцевые тигли; парафин; стальные изложницы с обратным и прямым конусом; прибыльные надставки.

#### Теоретическая часть

Переход вещества из жидкого состояния в твердое сопровождается, как правило, уменьшением объема. После заливки в изложницу начинается последовательное затвердевание жидкой стали в направлении от стенок изложницы к ее оси. Затвердевание первого слоя сопровождается понижением уровня жидкости в незатвердевшей части слитка. Последующее затвердевание остальных слоев приводит к еще большему снижению уровня жидкости. Так образуется воронкообразная впадина – усадочная раковина.

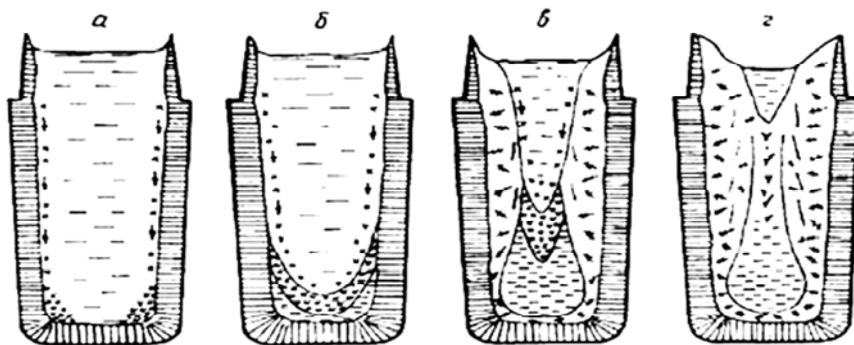


Рис. 5.1. Схема процесса затвердевания слитка

Усадочная раковина обычно не сосредотачивается в одной полости. В ходе кристаллизации растущие навстречу друг другу кристаллы могут соединяться и изолировать нижние объемы незатвердевшей части слитка от основной массы жидкого вещества. В этих изолированных объемах незатвердевшей части слитка образуются усадочные полости, которые часто имеют небольшие размеры и называются усадочной пористостью (рыхлостью), расположенной вблизи оси слитка.

Глубина усадочной раковины определяется той точкой слитка, которая затвердевает последней. Эта точка слитка называется его тепловым центром и смещена всегда в сторону наиболее массивной его части. Следовательно, для уменьшения глубины усадочной раковины массивная часть слитка всегда должна быть расположена в верхней части изложницы. Часть слитка, содержащая усадочную раковину, при прокатке или ковке обрезается как не пригодная для получения изделий. И хотя объем усадочной раковины в стальном слитке сравнительно мал, доля выбрасываемой его части достигает 20 %. Для уменьшения глубины проникновения усадочной раковины изменяют форму изложницы, используют прибыльные надставки, покрывают поверхность залитого металла в прибыльной надставке теплоизолирующими или разогревающими смесями.

Неравномерность размеров сечений слитка оценивается его конусностью  $K$ :

$$K = \frac{a_1 - a_2}{2H} \cdot 100 \%, \quad (5.1)$$

где  $a_1$  – длина стороны в верхнем сечении, м;

$a_2$  – длина стороны в нижнем сечении, м;

$H$  – высота слитка, м.

Если  $a_1 > a_2$ , слиток расширен кверху и конусность имеет положительный знак. Если  $a_1 < a_2$ , слиток расширен книзу. В расширенном кверху слитке тепловой центр расположен всегда

выше, а глубина усадочной раковины всегда меньше, чем в слитке с обратной конусностью.

Полезный объем слитка можно определить по формуле

$$V_{\text{сл}} = \frac{h_{\text{сл}}}{3} \cdot (S_1 + \sqrt{S_1 \cdot S_2} + S_2), \text{ см}^3, \quad (5.2)$$

где  $h_{\text{сл}}$  – высота слитка, не пораженного усадочной раковинной, см;

$S_1$  – площадь верхнего основания годного слитка,  $\text{см}^2$ ;

$S_2$  – площадь нижнего основания годного слитка,  $\text{см}^2$ .

Процент выхода годного слитка ( $A$ ) определяется по формуле

$$A = \frac{V_{\text{сл}}}{V_{\text{изл}}} \cdot 100 \%, \quad (5.3)$$

где  $V_{\text{изл}}$  – объем изложницы,  $\text{см}^3$ .

### Порядок выполнения работы

1. Моделирующий материал загрузить в кварцевые тигли и поместить в сушильный шкаф с температурой 79–80 °С. После его расплавления извлечь тигель, измерить температуру жидкого расплава и разлить в различные по форме изложницы. Скорость разлива должна быть одинаковой.

2. Затвердевшие слитки извлечь из изложниц и разрезать их по оси. Измерить высоту годного слитка, площади сечений и другие параметры, необходимые для расчета по формулам (5.1)–(5.3). Определить конусность изложниц, объем годных слитков и выход годного.

### Содержание отчета

1. Привести эскизы полученных слитков, необходимые расчеты для определения конусности, полезного объема и выхода годного.

2. Сделать выводы по влиянию конусности и типа изложниц на формирование усадочной раковины.

## Лабораторная работа № 6

### ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ

**Цель работы:** овладение методом получения сплавов высокой степени чистоты путем возгонки с последующей перекристаллизацией.

**Оборудование и материалы:** силитовая печь; кварцевая пробирка; алундовые тигли; вакуумный насос; водоохлаждаемый холодильник; слитки сурьмы; весы с разновесами.

#### Теоретическая часть

Развитие ряда новых областей науки и техники потребовало применения металлов и других веществ высокой степени чистоты. Такие материалы необходимы, например, для атомной и полупроводниковой техники, квантовой электроники, радиотехники и др.

Необходимость применения сверхчистых материалов обусловлена тем, что их основные физико-химические и механические свойства претерпевают резкие изменения даже при ничтожно малых содержаниях примесей. Так, миллиардная доля примесей изменяет электрические характеристики германия и других полупроводниковых материалов. Присутствие даже ничтожного количества некоторых примесей повышает способность циркония, алюминия и магния к поглощению тепловых нейтронов и тем самым лишает их основного свойства, необходимого для использования в атомной технике. Высокие требования, предъявляемые к чистоте материалов и совершенству их структуры, не могут быть удовлетворены при получе-

нии их обычным металлургическим и химическим методами. Поэтому возникла необходимость изыскания и разработки новых, более совершенных методов глубокой очистки металлов и других веществ.

К таким методам, получившим широкое распространение, относятся зонная плавка, вытягивание слитков из расплава, возгонка с последующей перекристаллизацией.

### *Зонная плавка*

Этот метод в основном применяется для разделения и глубокой очистки исходных материалов от примесей, температура плавления которых ниже, чем у основного металла. Зонную плавку можно использовать также для выращивания монокристаллов. Схема установки для зонной плавки показана на рис. 6.1.

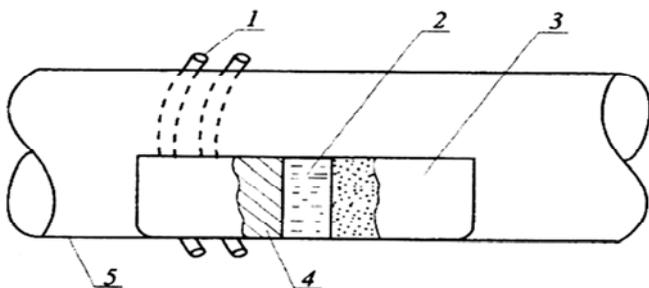


Рис. 6.1. Схема установки для ведения зонной плавки

Длинный тонкий слиток металла 2, подлежащего очистке, загружают в кварцевую или графитовую лодочку 3. Лодочку со слитком помещают в горизонтальную кварцевую трубу 5, образующую рабочее пространство установки. Затем трубу вводят в кольцевой нагреватель или высокочастотный индуктор 1. По мере расплавления металла и образования жидкой зоны 4 нагреватель перемещают относительно лодочки со ско-

ростью 0,5–2 мм/мин. При этом расплавленная часть слитка, выходя из сферы действия нагревателя, начинает затвердевать, а примеси остаются в жидкой фазе. Таким путем расплавленная зона постепенно будет проведена от одного конца слитка до другого.

Стремясь остаться в жидкой фазе, примеси будут все сильнее насыщать расплав и одновременно отесняться в хвостовую часть слитка. В результате слиток станет значительно чище, чем был до расплавления, а хвостовая часть окажется сильно насыщенной примесями. Отрезав эту часть слитка и повторяя процесс плавки несколько раз, можно получить слитки требуемой чистоты.

### Вытягивание кристаллов из расплава

Принципиальная схема этого метода показана на рис. 6.2.

Установка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру 1, выполненную из кварца. Вокруг тигля размещается высокочастотный нагреватель 7. В жидкий металл 5, находящийся в кварцевом или графитовом тигле 6, опускают затравку 3 из этого же металла, которая, поднимаясь вверх, вытягивает за собой из жидкой фазы кристаллизующуюся твердую фазу 4. Для получения слитка симметричной формы шток 2 с держателем вращается в процессе вытягивания кристаллов. Вытягивание проводится в вакууме или в среде инертного газа. В результате этого процесса металл оказывается значительно чище исходного.

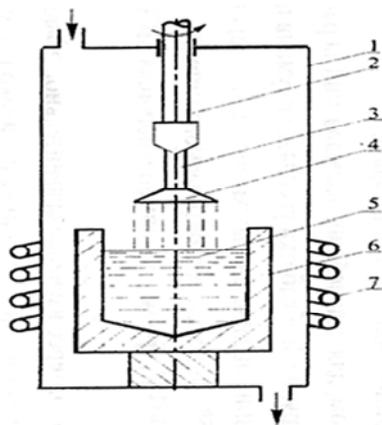


Рис. 6.2. Схема установки по методу вытягивания слитка из расплава

## *Возгонка с последующей перекристаллизацией*

Этот метод основан на различии в температурах испарения основного металла и примесей, имеющих высокую температуру испарения.

Для изучения процесса используется установка, представленная на рис. 6.3.

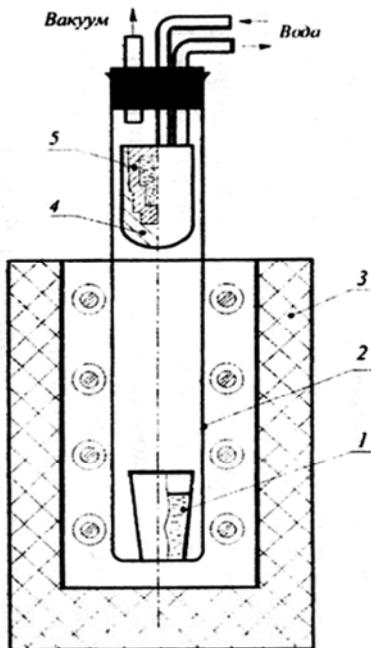


Рис. 6.3. Схема установки для проведения возгонки металла с последующей перекристаллизацией

Она состоит из силиковой печи 3, в которую помещается кварцевая пробирка 2. В пробирке находится тигель со слитком металла 1. Пробирка соединена с вакуумным насосом. В верхней ее части установлен водоохлаждаемый холодильник 4, на котором конденсируются пары металла и формируется перекристаллизованный слиток 5.

## Порядок выполнения работы

1. Поместить в кварцевую пробирку взвешенный слиток сурьмы, предварительно загрязненный свинцом или медью.
2. После создания вакуума в пробирке последнюю опустить в шахтную силитовую печь, нагреть до температуры 800 °С и выдержать при данной температуре 1 час.
3. Пробирку охладить на воздухе и извлечь перекристаллизовавшийся слиток сурьмы и слиток примесных металлов. Взвешиванием определить качество очистки сурьмы.

## Содержание отчета

1. Привести схему установки для очистки металлов перекристаллизацией и таблицу с данными о потере примесей слитком после возгонки.
2. Сделать теоретическое обоснование полученного результата и общие выводы по работе.

## Лабораторная работа № 7

### ДИССОЦИАЦИЯ И ОБЖИГ СУЛЬФИДОВ

**Цель работы:** изучение реакции взаимодействия сульфида металла с водородом и экспериментальное определение температурных границ области сульфатирующего и окислительного обжига.

**Оборудование и материалы:** установки для изучения диссоциации и обжига сульфидов; сульфиды металлов.

### Теоретическая часть

В практике производства цветных металлов большую роль играют сульфиды. Диссоциация сульфидов в металлургических агрегатах, протекающая обычно при высоких температурах, дает

газообразную серу. Однако, при относительно низких температурах сера в газовой фазе будет в основном в виде  $S_2$ ,  $S_4$  и  $S_6$ , а при температурах выше  $750\text{ }^\circ\text{C}$  – практически только в виде  $S_2$ . При температурах выше  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  появляется атомарная сера.

Исходя из этого, для обычных условий металлургических процессов уравнение диссоциации (образования сульфида) имеет вид:



В связи с тем, что данная двухкомпонентная система имеет две фазы и одну степень свободы, равновесие системы, характеризующееся давлением паров серы, будет зависеть только от температуры:

$$k_p = p_{S_2} = f(T).$$

Равновесное давление серы – упругость диссоциации сульфида – может служить критерием прочности сульфида (сродства металла к сере), характеризующегося нормальным химическим сродством металла к сере:

$$\Delta G^0 = -4,575 \cdot \lg p_{S_2}.$$

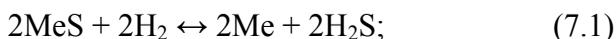
При давлении паров серы ниже упругости диссоциации сульфиды распадаются. Если металл дает ряд сульфидов, то их диссоциация подчиняется принципу последовательности превращений. Так, пирит  $\text{FeS}_2$ , являющийся высшим сульфидом железа, диссоциирует по реакции



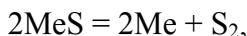
Упругость диссоциации пирита при температуре  $690\text{ }^\circ\text{C}$  достигает 1 атм. Упругость диссоциации односернистого железа  $\text{FeS}$  намного меньше.

При взаимодействии сульфидов с элементами, обладающими большим сродством к сере, один элемент вытесняется другим. В ряду CaS, MnS, ZnS, FeS, NiS, PbS упругость диссоциации возрастает слева направо. Следовательно, в этом ряду кальций может вытеснять все другие металлы из их сульфидов.

Водород и некоторые сульфиды взаимодействуют с образованием сероводорода. Упругость диссоциации сульфида может быть определена косвенным методом при совместном рассмотрении реакций



Вычитая из уравнения (7.1) уравнение (7.2), получим



при этом

$$k_3 = p_{\text{S}_2} = \frac{k_1^2}{k_2}.$$

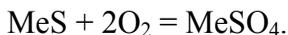
Располагая экспериментальными данными о составах равновесной газовой фазы для реакций (7.1) и (7.2), легко вычислить упругость диссоциации сульфида. Для расчета  $k_2$  можно пользоваться эмпирической формулой

$$\lg k_2 = \lg \frac{p_{\text{H}_2\text{S}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 \cdot p_{\text{S}_2}} = \frac{9539}{T} - 5,21.$$

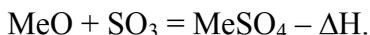
Действие кислорода на сульфиды в зависимости от условий приводит к образованию либо оксидов металлов, либо сульфидов. Следовательно, в зависимости от условий обжига можно обеспечить полное удаление серы и образование оксида (пол-

ный обжиг) или частичное удаление серы и образование сульфата (сульфатирующий обжиг).

Окисление сульфида и образование сульфата идут по реакциям



Образование сульфата возможно лишь в том случае, если парциальное давление серного ангидрида будет больше, чем равновесное его давление для реакции образования – диссоциации сульфата (упругости диссоциации).



При этом упругость диссоциации сульфата с повышением температуры возрастет в соответствии с кривой 1 (рис. 7.1).

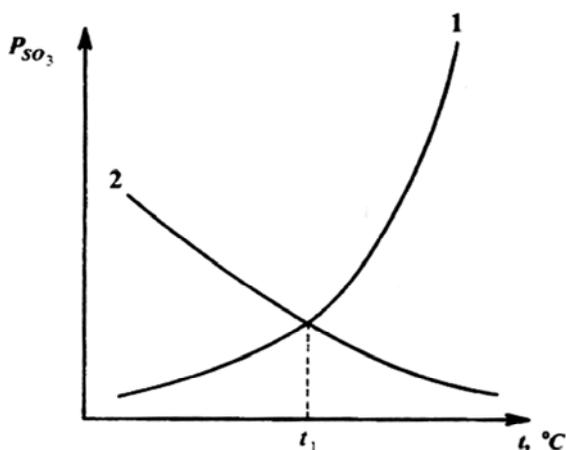


Рис. 7.1. Зависимость упругости диссоциации сульфата (1) и парциального давления (2) от температуры

Парциальное давление  $\text{SO}_3$  может быть определено из условия равновесия реакции



которое определяется соотношением

$$k_p = \frac{p_{\text{SO}_2}^2 \cdot p_{\text{O}_2}}{p_{\text{SO}_3}^2},$$

отсюда

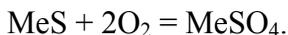
$$p_{\text{SO}_3} = p_{\text{SO}_2} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}}{k_p}}.$$

В соответствии с принципом Ле Шателье, повышение температуры и понижение давления смещает равновесие последней реакции в сторону разложения серного ангидрида.

Зависимость парциального давления серного ангидрида в равновесной газовой смеси от температуры при постоянном общем давлении схематично представлено кривой 2 на рис. 7.1.

Отсюда следует, что до температуры  $t_1$  парциальное давление серного ангидрида больше упругости диссоциации сульфата, поэтому последний будет образовываться. При более высоких температурах парциальное давление серного ангидрида меньше упругости диссоциации сульфата и не может обеспечить его существование.

Указанные обстоятельства определяют поведение сульфидов в окислительной среде. При температурах ниже  $t_1$  сульфат образуется по уравнению



Таким образом, образованию сульфата благоприятствует окислительная среда и умеренные температуры. В таких условиях производится сульфатирующий обжиг сульфидов. При более высоких температурах, при которых сульфат существовать не может, взаимодействие сульфата с кислородом приводит к образованию оксидов металла и оксидов серы. В случаях, когда ставится задача превратить сульфид в оксид металла, проводится обжиг.

Изучение реакции взаимодействия сульфида металла с водородом проводится на установке (рис. 7.2), состоящей из вертикальной трубчатой печи 1 с фарфоровой реакционной трубкой 2, в которую на сетку помещается сульфид металла. К нижнему концу реакционной трубки через реометр 3 и осушительную склянку 4 подводится водород. Получающаяся газовая смесь через трехходовый кран 5 поступает в газоанализатор, состоящий из мерного цилиндра с бюреткой 6, поглотительного сосуда 7 с краном 8, заполненного уксуснокислым кадмием, уравнительной склянкой 9 и крана 10. Температуру контролируют термопарой 11 с гальванометром, горячий спай которой находится непосредственно под слоем сульфида.

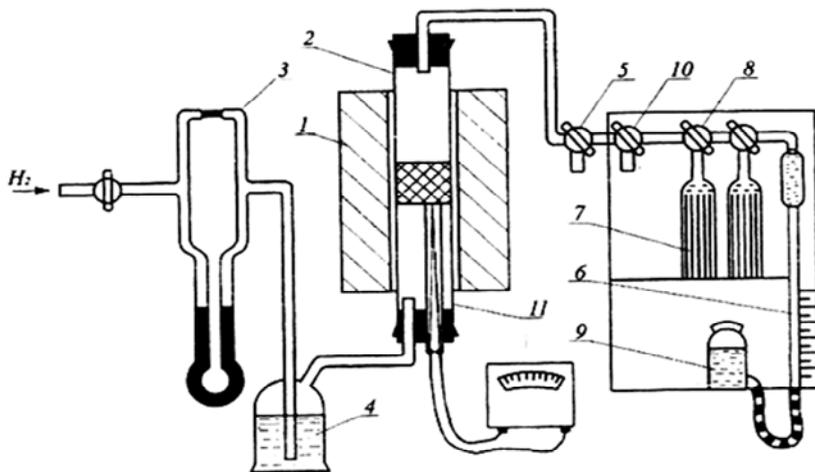


Рис. 7.2. Схема установки для исследования процесса диссоциации сульфида

Установка (рис. 7.3) для исследования обжига сульфидов состоит из вертикальной печи 1 и реакционной трубки, в которой на нихромовой проволоке подвешен тиглик 3 с сульфидом. Второй конец проволоки закреплен на коромысле аналитических весов 4. Температура контролируется термопарой 5.

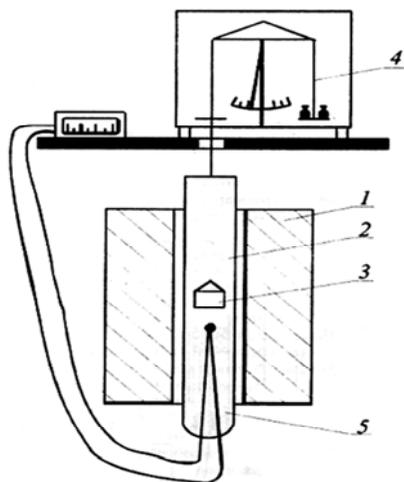


Рис. 7.3. Схема установки для исследования процесса обжига сульфидов

### Порядок выполнения работы

1. В реакционную трубу поместить 25 г исследуемого сульфида. Не включая печь, в течение 10 мин через установку (рис. 7.2) пропускать водород, для чего источник водорода соединить с реакционной системой, а последнюю с помощью трехходового крана – с атмосферой, отключив в то же время от газоанализатора.

2. Включить печь и как можно быстрее довести до заданной температуры реакционного пространства, после чего поддерживать ее постоянной. Подготовить газоанализатор к отбору пробы газа. Для этого уровень жидкости в поглотительном сосуде и в мерном цилиндре установить на нулевой отметке, а краны 8 и 10 перекрыть. Установить заданный расход водорода и через 10 мин после достижения заданной температуры взять пробу газа, для чего трехходовые краны поставить в положение, при котором реакционное пространство соединено с газоанализатором, а вся система изолирована от атмосферы. Уравнительную склянку поместить в нижнее положение. К концу отбора пробы

газа, когда уровень жидкости в мерном цилиндре опустится до отметки 100 мл, пользуясь уравнильной склянкой, выровнять давление в газоанализаторе с атмосферным.

3. Газоанализатор с помощью трехходового крана отключить от реакционного пространства, соединив последнее с атмосферой. Провести анализ газа за счет поглощения сероводорода уксуснокислым кадмием. Для этого открыть кран  $\delta$  и, манипулируя уравнильной склянкой, перегонять газ из мерного цилиндра в поглотитель и обратно, пока его объем не станет постоянным, что будет указывать на полное поглощение сероводорода. При замере объемов давление в газоанализаторе выровнять с атмосферным. Анализ газа при каждой температуре опыта повторить не менее двух раз. Состав газовой смеси исследовать при трех–четырёх заданных температурах. По окончании работы прекратить подачу водорода и выключить печь.

4. Для изучения обжига сульфидов тигель с исследуемым сульфидом (с навеской 2 г) опустить в реакционную трубку (рис. 7.3) и подвести к коромыслу весов. Включить печь и равномерно нагревать реакционное пространство. По мере подъема температуры через 20–30 °С фиксировать вес исследуемого материала. Верхний температурный предел указывается преподавателем. После окончания опыта выключить печь, а тигель извлечь из реакционной трубы.

### **Содержание отчета**

1. Привести результаты определения составов равновесных газовых смесей, расчеты упругости диссоциации сульфида при температурах опыта и график зависимости упругости диссоциации от температуры.

2. Обжиг сульфидов представить таблицей с результатами измерений и графиком зависимости веса исследуемого материала от температуры с указанием температурных границ области сульфатирующего и окислительного обжига, а также расчетами полноты превращений сульфида в сульфат и оксид.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 3  |
| Правила охраны труда и противопожарной безопасности при выполнении лабораторных работ .....                | 4  |
| Лабораторная работа № 1.<br>Изучение сырых материалов и способов их подготовки к доменной плавке .....     | 5  |
| Лабораторная работа № 2.<br>Восстановление оксидов железа и шлакование пустой породы в доменной печи ..... | 10 |
| Лабораторная работа № 3.<br>Расчет шихты для выплавки передельного чугуна .....                            | 15 |
| Лабораторная работа № 4.<br>Изучение процесса кристаллизации слитков на прозрачной модели .....            | 25 |
| Лабораторная работа № 5.<br>Моделирование процесса разливки стали в изложницы .....                        | 30 |
| Лабораторная работа № 6.<br>Получение металлов высокой степени чистоты .....                               | 33 |
| Лабораторная работа № 7.<br>Диссоциация и обжиг сульфидов .....  | 37 |

Учебное издание

## **ОБЩАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ**

Лабораторный практикум  
для студентов специальности  
1-42 01 01 «Металлургическое производство  
и материаловедение (по направлениям)»

Составители:

**НЕМЕНЁНОК** Болеслав Мечеславович  
**РУМЯНЦЕВА** Галина Анатольевна

Редактор *Ю. В. Ходочинская*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 31.08.2018. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 100. Заказ 326.

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.