



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Металлургические технологии»

**ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

Лабораторные работы (практикум)

Часть 1

**Минск
БНТУ
2015**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Металлургические технологии»

ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Лабораторные работы (практикум)
для студентов специальности
1-42 01 01 «Металлургическое производство
и материалобработка»

В 2 частях

Часть 1

Минск
БНТУ
2015

УДК 669.18.046

ББК 34.32

Т38

Составители:

С. В. Корнеев, И. А. Трусова

Рецензенты:

Б. М. Немененок, А. В. Толстой

Технология металлургического производства : лабораторные работы (практикум) для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка» : в 2 ч. / сост.: С. В. Корнеев, И. А. Трусова. – Минск : БНТУ, 2015– . – Ч. 1. – 2015. – 52 с.

ISBN 978-985-550-268-6 (Ч. 1).

Лабораторные работы (практикум) предназначены для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении курса, а также для приобретения практических навыков по расчету различных металлургических процессов, протекающих в металлургических агрегатах.

УДК 669.18.046

ББК 34.32

ISBN 978-985-550-268-6 (Ч. 1)
ISBN 978-985-550-269-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 Расчет равновесий реакций по термическим данным.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 Расчет активности оксида железа.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 Определение эффективности скачивания шлака при дефосфорации и десульфурации расплава стали в основной печи.....	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 Определение равновесных коэффициентов распределения серы между шлаком и металлом.....	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 Технологии восстановления железа из руд в шахтных печах.....	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 Перемешивание и дегазация стали при продувке нейтральным газом.....	43
ПРИЛОЖЕНИЯ	49

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум включает в себя девять лабораторных работ по основным разделам курса «Технология металлургического производства» для специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалообработка» дневной и заочной форм обучения.

Выполнение лабораторных работ требует предварительного ознакомления с макетами металлургического оборудования и (или) виртуальными моделями агрегатов и технологий, демонстрирующих работу реальных металлургических агрегатов и действия, проводимые для отбора проб металла, замера температуры и других технологических операций.

Также студентам рекомендуется провести моделирование технологических процессов по выплавке, внепечной обработке и разливке стали с использованием реалистичной виртуальной среды в разделе интернет-образование (e-Learning) на сайте <http://www.steeluniversity.org>.

Оформление отчетов о выполненной работе осуществляется на листах формата А4 в рукописном или печатном виде. Каждая выполненная работа требует ее защиты путем ответов на контрольные вопросы.

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Расчет равновесий реакций по термическим данным

Цель работы: Изучение теоретических основ протекания металлургических реакций, расчет возможности осуществления реакции при заданных условиях.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Способность различных веществ взаимодействовать между собой с образованием новых веществ называют химическим сродством. Полнота реакции возрастает с увеличением химического сродства между веществами. В 60-е годы 19 века русский ученый Бекетов высказал мысль, что за меру химического сродства между веществами должна быть принята максимальная работа реакции или изменение свободной энергии.

Для расчета равновесий химических реакций необходимы параметры начального и конечного состояний системы и внешних условий, в которых осуществлялся процесс.

Основной закон термодинамики (закон Гесса):

Тепловой эффект физико-химических процессов, протекающих при заданных условиях, не зависит от пути протекания процесса, а зависит только от начального и конечного состояний системы при условии, что давление или объем в течение всего процесса остается неизменным.

Скорость химической реакции пропорциональна вероятности столкновения частиц реагирующих компонентов.

Уравнение закона действия масс:

Скорость химической реакции пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, возведенных в степени, равные стехиометрическим коэффициентам.

Например, для протекания реакции $[\text{Si}] + 2[\text{O}] = \text{SiO}_2$ вероятность одновременного столкновения одного атома кремния и двух атомов кислорода пропорциональна произведению $C_{[\text{Si}]}C_{[\text{O}]}^2 = C_{[\text{Si}]}C_{[\text{O}]}^2$, а скорость прямой реакции

$$v_1 = K_1 C_{[\text{Si}]} C_{[\text{O}]}^2.$$

В общем случае для реакции $aA + bB + \dots = dD + eE + \dots$ скорость прямой реакции

$$v_1 = K_1 C_A^a C_B^b \dots,$$

скорость обратной реакции

$$v_2 = K_2 C_D^d C_E^e \dots,$$

где C – концентрация компонента в растворе.

В момент равновесия

$$v_1 = v_2 \text{ и } C_A^a C_B^b \dots / (C_D^d C_E^e \dots) = K_1/K_2 = K_p \quad (1)$$

Так как константы скорости K_1 и K_2 постоянны при $T = \text{const}$, то и константа равновесия реакции K_p – постоянная величина при постоянной температуре.

При равновесии химической реакции отношение произведения концентраций продуктов реакции, возведенных в степени, равные стехиометрическим коэффициентам, к произведению концентраций исходных веществ, возведенных в соответствующие степени, является величиной постоянной при постоянной температуре.

При участии в реакции газообразных компонентов их концентрацию в уравнении (1) часто выражают через парциальные давления:

$$2[C] + \{O_2\} = 2\{CO\}; \quad K_p = \frac{P_{\{CO\}}^2}{[C]^2 P_{\{O_2\}}} \quad (2)$$

Величины констант равновесий и изменения свободной энергии рассчитывают на основе стандартных значений изменения энтальпии и энтропии при образовании соединений из элементов при 298 К и при конкретной температуре.

Между величинами ΔG_T и $\ln K_p$ существует следующая зависимость:

$$\Delta G_T = -RT \ln K_p, \quad (3)$$

где ($R=8,3143$ кДж/(кмоль·К)).

Константа равновесия определяется при известных равновесных концентрациях реагирующих веществ или по известной ΔG^0 химической реакции. Константы равновесия можно определить расчетным (точные или приближенные методы) или экспериментальным путем.

На направление химической реакции влияют два фактора: ΔH и ΔS . Из соотношения величин этих факторов и решается вопрос о том, в каком направлении будет протекать химическая реакция.

Если $\Delta G < 0$, то реакция идет в прямом направлении, и чем более отрицательна величина ΔG , тем более энергично идет реакция. При $\Delta G > 0$ реакция в прямом направлении самопроизвольно не идет. Величина и знак изобарно-изотермического потенциала зависят от соотношения ΔH и $T\Delta S$. Так, значение изобарно-изотермического потенциала $\Delta G < 0$ может быть в следующих случаях:

1. $\Delta H < 0$, $\Delta S < 0$ – процесс будет идти, если ΔH по абсолютной величине будет больше, чем $T\Delta S$ (реакция может идти самопроизвольно при низких температурах).

2. $\Delta H < 0$, $\Delta S > 0$ и тогда $\Delta G < 0$, реакция идет.

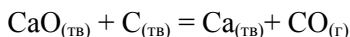
3. $\Delta H > 0$, $\Delta S > 0$. В данном случае реакция идет, если вклад энтропийного фактора велик, т.е. при высоких температурах.

4. При $\Delta H > 0$, $\Delta S < 0$, то $\Delta G > 0$, и реакция не должна идти самопроизвольно.

Несмотря на то, что величина свободной энергии Гиббса определяет направление процесса, абсолютно уверенно говорить о направлении протекания реакции можно лишь в том случае, если абсолютное значение ΔG велико. При малой абсолютной величине ΔG нельзя однозначно судить о возможности протекания реакции, так как ΔG зависит и от других факторов, например, от температуры, концентрации.

При высоких температурах значение энтропийного фактора возрастает, а это может привести к изменению направления реакции.

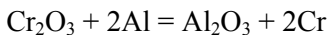
Так, для реакции восстановления оксида кальция углеродом при стандартных условиях



величины изменения энтальпии и изобарно-изотермического потенциала имеют положительное значение:

$$\begin{aligned}\Delta H &= 635,1 - 110,5 = 524,6 \text{ кДж/моль}, \Delta H > 0; \\ \Delta G &= -137,24 + 604,17 = 466,93 \text{ кДж/моль}, \Delta G > 0.\end{aligned}$$

Отсюда следует, что при нормальных условиях эта реакция самопроизвольно не идет, но при высоких температурах ее протекание вполне возможно. А вот для реакции восстановления оксида хрома алюминием



величина изобарно-изотермического потенциала имеет значение меньше нуля:

$$\Delta G = -1669,42 + 1142,23 = -527,19 \text{ кДж/моль.}$$

Следовательно, термодинамически эта реакция должна протекать, но для того, чтобы она осуществилась на самом деле, также необходима высокая температура. Изобарно-изотермический потенциал является функцией состояния системы, а это значит, что изменение изобарного потенциала, так же как и изменение энтропии и энтальпии системы, не зависит от пути процесса. Отсюда

$$\Delta G = \Sigma \Delta G_{\text{прод.}} - \Sigma \Delta G_{\text{исх.}}$$

Изменение изобарно-изотермического потенциала можно вычислить по изменениям стандартных энтальпий и энтропий.

Пример:

Вычислить изменение стандартной свободной энергии Гиббса при 298 К для реакции термического разложения карбоната кальция (кальцита), если известно (см. табл.1 приложения), что при образовании CaCO_3 значения энтропии и энтальпии: $\Delta H_{298} = -1206$ кДж/моль, $\Delta S_{298} = +92,9$ Дж/(моль·К); CaO : $\Delta H_{298} = -635,5$ кДж/моль, $\Delta S_{298} = +39,7$ Дж/(моль·К); CO_2 : $\Delta H_{298} = -393,5$ кДж/моль, $\Delta S_{298} = +213,7$ Дж/(моль·К). При какой температуре возможно протекание этой реакции?

Решение

Уравнение реакции разложения карбоната кальция имеет вид $\text{CaCO}_{3(\text{ТВ})} = \text{CaO}_{(\text{ТВ})} + \text{CO}_{2(\text{Г})}$.

1) Находим изменение стандартной энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала) по формуле $\Delta G_{298} = \Sigma \Delta G_{\text{прод.}} - \Sigma \Delta G_{\text{исх.}}$:

$$\Delta H_{298} = (-635,5 + -393,5) - (-1206) = +177 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta S_{298} = (39,7 + 213,7) - 92,9 = +160,5 \text{ Дж/(моль·К)};$$

$$\Delta G_{298} = \Delta H_{298} - T\Delta S_{298} = 177 \cdot 10^3 - 298 \cdot 160,5 = +129,17 \text{ кДж/моль.}$$

Так как реакция самопроизвольно может протекать при $\Delta G < 0$, а для конкретной реакции эта величина больше нуля, то при 298 К реакция самопроизвольно не должна протекать.

2) Для определения температуры, при которой возможна реакция, используем выражение

$$\Delta G_{298} = \Delta H_{298} - T\Delta S_{298} < 0 \text{ или } \Delta H_{298} < T\Delta S_{298} \text{ или } T > \Delta H_{298} / \Delta S_{298}.$$

Температура, начиная с которой становится возможным самопроизвольное протекание данной реакции, определяется неравенством

$$T > 177000/160,5, \text{ т.е. } T > 1103 \text{ К.}$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Произвести взвешивание предварительно просушенных образцов материалов (известняк, уголь, древесина, смесь древесного угля и окалины) и установить в лабораторную нагревательную печь в открытых и закрытых тиглях. Извлекать образцы после нагрева и выдержки при определенной температуре с визуальным и весовым контролем наличия или отсутствия реакций разложения или взаимодействия. Теоретически рассчитать температуры протекания реакций получения извести из известняка, восстановления оксидов железа углеродом и сравнить с опытными данными.

Задание 2. Используя табличные данные, определить:

- 1) Осуществляется ли реакция при нормальных условиях.
- 2) Температуру осуществления реакции.
- 3) Тепловой эффект реакции.

Таблица 1 – Исходные данные к расчетам

Вариант	Реакция 1	Реакция 2
1	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}$	$\text{Ca} + \text{FeS} = (\text{CaS})_{\text{ТВ}} + \text{Fe}_{\text{Ж}}$
2	$\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$
3	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$	$4\text{Cr} + 3\text{O}_2 = 2(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{\text{ТВ}}$
4	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	$2\text{Na} + \text{FeS} = \text{Na}_2\text{S} + \text{Fe}$
5	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	$\text{Mn} + \text{FeS} = \text{MnS} + \text{Fe}$
6	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaO} + \text{FeS} = \text{CaS} + \text{FeO}$
7	$\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$	$\text{Na}_2\text{O} + \text{FeS} = \text{Na}_2\text{S} + \text{FeO}$
8	$\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{CO} + \text{H}_2$	$\text{MnO} + \text{FeS} = \text{MnS} + \text{FeO}$
9	$\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$	$\text{Mn} + 0,5\text{O}_2 = (\text{MnO})_{\text{ТВ}}$
10	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	$\text{Mo} + \text{O}_2 = (\text{MoO}_2)_{\text{ТВ}}$
11	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	$\text{Zr} + \text{O}_2 = (\text{ZrO}_2)_{\text{ТВ}}$
12	$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	$4\text{Al} + 3\text{O}_2 = 2(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{ТВ}}$

13	$\text{Mo} + \text{O}_2 = (\text{MoO}_2)_{\text{ТВ}}$	$\text{Ti} + \text{O}_2 = (\text{TiO}_2)_{\text{ТВ}}$
14	$4\text{Cr} + 3\text{O}_2 = 2(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{\text{ТВ}}$	$\text{Si} + \text{O}_2 = (\text{SiO}_2)_{\text{ТВ}}$
15	$4\text{V} + 5\text{O}_2 = 2(\text{V}_2\text{O}_5)_{\text{ТВ}}$	$\text{Co} + 0,5\text{O}_2 = (\text{CoO})_{\text{ТВ}}$
16	$\text{Mn} + 0,5\text{O}_2 = (\text{MnO})_{\text{ТВ}}$	$2\text{Cu} + 0,5\text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O}$

Контрольные вопросы:

1. При каких условиях возможно самопроизвольное протекание реакции.
2. Сформулируйте закон Гесса.
3. Сформулируйте закон действия масс.
4. Связь энергии Гиббса с энтальпией и энтропией.
5. Какова зависимость энергии Гиббса от константы равновесия реакции.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Расчет активности оксида железа

Цель работы: практическое изучение расчетных и экспериментальных методов определения активности оксида железа

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

На основании закона действующих масс можно установить постоянные значения констант равновесия только для идеальных газов и идеальных растворов. Чтобы применять этот закон для реальных газов и реальных растворов, при образовании которых наблюдается изменение объема и заметный тепловой эффект, вводят поправочные коэффициенты, называемые активностями a или летучестями f . Величину активности или летучести вещества определяют умножением его концентрации или парциального давления на коэффициент активности.

$$a = N\gamma, \tag{1}$$

$$f = p\gamma$$

где N – молярная или атомная доля вещества, γ – коэффициент активности, p – парциальное давление.

Активность и коэффициент активности компонента зависят от состава раствора, а также от температуры и давления.

Летучесть вещества определяется отношением давления пара компонента в данном состоянии к давлению его пара в стандартном состоянии:

$$f = p_{д.с.}/p_{с.с.} \quad (2)$$

В стандартном состоянии могут находиться чистые жидкие и твердые вещества под давлением 101,3 кПа, а также растворенные вещества и газы, если активность каждого компонента равна 1.

Так металлургические системы являются реальными, необходимо во всех уравнениях оперировать не концентрациями, а активностями.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ТЕОРИЯ ШЛАКОВ

Молекулярная теория шлаков развита в работах В.В. Грум-Гржимайло, М.М. Карнаухова, Г. Шенка, Дж. Чипмена и др. Предполагали, что шлак состоит из электронейтральных молекул свободных оксидов, сульфидов и соединений оксидов (в расчетах учитывались лишь наиболее прочные соединения). Основные оксиды: RO, CaO, MgO, MnO, FeO. Кислотные оксиды: SiO₂, P₂O₅, Al₂O₃, Fe₂O₃, Cr₂O₃. Силикаты – 2RO·SiO₂; фосфаты – 4RO·P₂O₅; ферриты – 2RO·Fe₂O₃; алюминаты – 2RO·Al₂O₃; хромиты – RO·Cr₂O₃; сульфиды – RS.

При разработке вариантов молекулярной теории строения шлаков предполагалось, что наибольшие силы взаимодействия между молекулами проявляются лишь при образовании химических соединений, т. е. предпочтение отдавалось гомеоплярной связи, а слабыми видами (вандерваальсовыми) взаимодействия между молекулами пренебрегали, приравнивая активности свободных оксидов и их соединений к соответствующим концентрациям.

Методика расчета состава шлаков, наиболее полно учитывающая процессы, протекающие в нем, получила название метода Чипмена. Дж. Чипмен с сотрудниками (1946 г.) более правильно определили активность оксида железа (II) $a_{(FeO)}$ и других оксидов в шлаке, сопоставив состав шлака с содержанием кислорода и других примесей в железе при равновесии со шлаком, а не по ходу обезуглероживания стали.

На большом количестве опытов в тиглях с нейтральной атмосферой исследовали равновесие шлака с безуглеродистым железом. Истинную $a_{(FeO)}$ определили по содержанию кислорода в металле при равновесии со шлаком.

$$a_{(FeO)} = \frac{[\%O]}{L_0}, \quad (3)$$

где $a_{(FeO)}$ – активность компонента FeO в системе, учитывающая отклонение свойств компонента в реальной системе от его свойств в идеальной системе;

$[\%O]$ – процентное содержание кислорода в расплаве металла;

L_0 – коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком

Коэффициентом распределения L_0 называют соотношение содержания растворенного в соприкасающихся фазах компонента при данной температуре в условиях равновесия, которое наступает при равенстве химических потенциалов (парциальной мольной свободной энергии) данного компонента в обеих фазах и характеризуется равными скоростями его перехода из металла в шлак и обратно.

Исследования большого количества шлаков различных составов позволило Дж. Чипмену определить зависимости $a_{(FeO)}$ от основности шлака B

Основность шлака определяется по формуле:

$$B = \frac{n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO}}{n_{SiO_2} + 2n_{P_2O_5} + n_{Al_2O_3} + 0,5n_{Fe_2O_3}}, \quad (4)$$

где n – число молей оксида

$$n_{FeO} = \frac{(\%FeO)}{M_{FeO}}; n_{CaO} = \frac{(\%CaO)}{M_{CaO}}; n_{MgO} = \frac{(\%MgO)}{M_{MgO}}; \quad (5)$$

$$n_{MnO} = \frac{(\%MnO)}{M_{MnO}}; n_{SiO_2} = \frac{(\%SiO_2)}{M_{SiO_2}}; n_{P_2O_5} = \frac{(\%P_2O_5)}{M_{P_2O_5}}, [\text{моль}].$$

Общее количество молей оксидов в шлаке определяется по формуле:

$$\Sigma n_{RO} = n_{FeO} + n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO} + n_{SiO_2} + n_{P_2O_5}, [\text{моль}] \quad (6)$$

Мольная доля оксида железа определяется по формуле:

$$x_{(FeO)} = \frac{n_{FeO}}{\Sigma n_{RO}}. \quad (7)$$

Согласно предположению Чипмена в шлаке также образуются двоянные молекулы силикатов и фосфатов, которые уменьшают количество свободных оксидов в шлаке. Число молей силикатов и фосфатов определяется по формулам:

$$n_{(2CaO \cdot SiO_2)_2} = \frac{(\%CaO) \frac{2n_{SiO_2}}{n_{CaO}} + (\%SiO_2)}{2(2M_{CaO} + M_{SiO_2})}, [\text{моль}] - \text{метасиликат}$$

кальция

$$n_{(4CaO \cdot P_2O_5)_2} = \frac{(\%CaO) \frac{2n_{P_2O_5}}{n_{CaO}} + (\%P_2O_5)}{2(2M_{CaO} + M_{P_2O_5})}, [\text{моль}] - \text{четырёх-}$$

кальциевый фосфат

С учетом образования двоянных молекул уменьшается и количество свободных оксидов, тогда количество свободных оксидов будет определяться по формуле:

$$\Sigma RO = (n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO}) - (2n_{SiO_2} + 4n_{P_2O_5}), [\text{моль}] \quad (9)$$

С учетом образования силикатов и фосфатов, количество молей химических соединений и свободных оксидов в шлаке определяется по формуле:

$$\Sigma n = n_{FeO} + n_{(2CaO \cdot SiO_2)_2} + n_{(4CaO \cdot P_2O_5)_2} + \Sigma RO, [\text{моль}] \quad (10)$$

Активность оксида железа (II) определяется по формуле:

$$a_{(FeO)} = \frac{n_{FeO}}{\sum n} \quad (11)$$

Коэффициент активности оксида железа (II) определяется по формуле:

$$\gamma_{(FeO)} = \frac{a_{(FeO)}}{x_{(FeO)}} \quad (12)$$

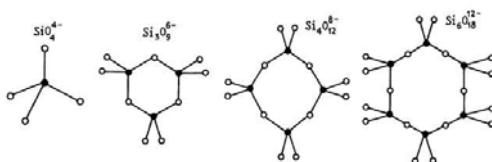
Молекулярная теория в ряде случаев весьма удобна для расчетов, однако необходимо отметить, что она не описывает реальные физико-химические процессы, происходящие в расплавах шлаков.

ТЕОРИЯ СОВЕРШЕННЫХ ИОННЫХ РАСТВОРОВ

Теория предложена М.И. Темкиным и может быть положена в основу расчетов активности оксидов в шлаке, если последний близок по свойствам к идеальному раствору ионов.

Свойства совершенных ионных растворов:

- раствор состоит только из ионов;
- одноименно заряженные ионы равноценны по размерам и заряду;
- ближайшие соседи любого иона имеют противоположный заряд, т. е. анионы могут меняться местами только с анионами, а катионы - только с катионами:



Таким образом, совершенный раствор, как и обычный идеальный раствор, характеризуется равномерным распределением частиц, но отличается от него дополнительным порядком расположения ионов, обусловленным их зарядом.

Поскольку на местах одних катионов становятся энергетически равноценные им другие катионы, а на местах одних анионов - экви-

валентные им по взаимодействию другие анионы, то теплоты смешения (т. е. изменение количества теплоты при растворении моля вещества в большом количестве расплава, Дж/моль) при образовании совершенного ионного раствора из компонентов принимается равной нулю. Поэтому не всякая величина активности определяется как производная по числу частиц лишь от энтропии смешения, особенности которой обусловлены дополнительной упорядоченностью ионного расплава. Активность ионов такого расплава оказывается равной отношению числа данных ионов к общему числу ионов того же знака, т. е. активность совпадает с ионной долей, а активность оксида равна произведению ионных долей составляющих его ионов.

За стандартное состояние принимается чистый оксид MO , $a_{mo}=1$.

Ионная доля данного иона подсчитывается как отношение числа грамм-ионов к общему числу грамм-ионов такого же знака:

$$x_{i+} = \frac{n_{i+}}{\sum n_{i+}}; \quad x_{i-} = \frac{n_{i-}}{\sum n_{i-}}. \quad (13)$$

В расчетах n_{i+} и n_{i-} учитывается, что 1 г-моль основного оксида дает 1 г-катион и 1 г-анион кислорода.

Каждый грамм-моль кислотного оксида образует:

SiO_2 - 1 анион SiO_4^{4-} ;

P_2O_5 - 2 аниона PO_4^{3-} ;

Al_2O_3 - 2 аниона $Al_2O_3^{3-}$;

Fe_2O_3 - 2 аниона FeO_2^{1-} .

Поэтому количество ионов в шлаке определяется:

$$\sum n_+ = n_{FeO} + n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO} \quad (14)$$

$$\sum n_- = \sum n_+ - n_{SiO_2} - n_{P_2O_5}$$

Количество катионов железа:

$$n_{Fe^{2+}} = n_{FeO} \quad (15)$$

Количество анионов кислорода:

$$n_{O^{2-}} = \sum n_+ - 2n_{SiO_2} - 3n_{P_2O_5} \quad (16)$$

В соответствии с теорией ионных растворов активность оксида железа (II) определяется:

$$a_{(FeO)} = x_{Fe^{2+}} \cdot x_{O^{2-}} = \frac{n_{Fe^{2+}} \cdot n_{O^{2-}}}{\Sigma n_+ \cdot \Sigma n_-} \quad (17)$$

Учитывая также отклонения реальных шлаков от рассматриваемой теории, А.М. Самарин и Л.А. Шварцман предложили следующее уравнение для расчета активности оксида железа (II) в шлаке:

$$a_{(FeO)} = x_{Fe^{2+}} \cdot x_{O^{2-}} \cdot \gamma_{Fe^{2+}} \cdot \gamma_{O^{2-}}, \quad (18)$$

где $\gamma_{Fe^{2+}} \cdot \gamma_{O^{2-}}$ – произведение коэффициентов активностей ионов железа и кислорода, которое рассчитывается по эмпирической формуле:

$$\begin{aligned} \lg(\gamma_{Fe^{2+}} \cdot \gamma_{O^{2-}}) &\approx \lg(\gamma_{Fe^{2+}} \cdot \gamma_{O^{2-}}) = \\ &= 1,53(x_{SiO_4^{4-}} + x_{PO_4^{3-}}) - 0,17 = 1,53 \left(\frac{n_{SiO_2} + n_{P_2O_5}}{\Sigma n_-} \right) - 0,17 \end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, в отличие от теории совершенных ионных растворов теория регулярных ионных растворов допускает возможность определенной упорядоченности заряженных частиц, поэтому она учитывает также теплоту смешивания ионов при образовании раствора. Согласно этой теории активность оксида в шлаке определяют как произведение ионной доли катиона на ионную долю аниона и коэффициент активности катиона, величина которого учитывает взаимодействие между компонентами расплава. Например, метод В.А. Кожеурова предложен для определения активности оксидов железа, марганца, магния и фосфора в оксидных шлаках высокой основности, в состав которых входят оксиды FeO, MnO, CaO, MgO, SiO₂ и P₂O₅.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассчитать активность оксида железа разными методами и сравнить значение с результатами эксперимента и с данными, приведенными на диаграмме (рис. 2) .

Данные для расчета:

Химический состав шлака, % (масс):

FeO – 15

MnO – 10

CaO – 40

MgO – 10

SiO₂ – 20

P₂O₅ – 5

Экспериментальное значение

t – 1600 °C

L₀ – 0,0023

[%O] – 0,075

$$a_{(FeO)} = \frac{[\%O]}{L_0} = 0,326 \text{ (мол.д)} = 32,6\% \text{ (мол.)}$$

Расчет по методу Чипмена (молекулярная теория шлаков)

	n _{FeO}	n _{MnO}	n _{CaO}	n _{MgO}	n _{SiO₂}	n _{P₂O₅}	n _{(2CaO·SiO₂)₂}	n _{(4CaO·P₂O₅)₂}
n, МОЛЬ								

B	ΣRO	Σn	a _(FeO)	γ _(FeO)

Расчет по теории совершенных ионных растворов

Σn ₊	Σn ₋	n _{Fe²⁺}	n _{O²⁻}	a _(FeO)

Расчет по теории ионных растворов (с учетом поправки Самарина-Шварцмана)

Σn_+	Σn_-	$n_{Fe^{2+}}$	$n_{O^{2-}}$	$x_{Fe^{2+}} \cdot x_{O^{2-}}$	$\gamma_{Fe^{2+}} \cdot \gamma_{O^{2-}}$	$a_{(FeO)}$

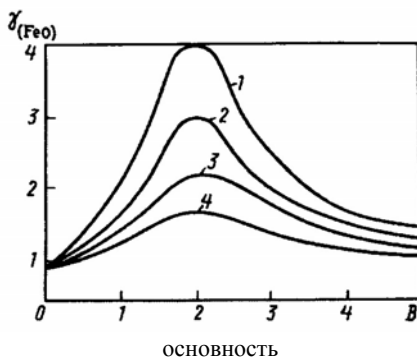


Рис. 1. Влияние основности шлака на коэффициент активности оксида железа (II) в шлаке: кривые в зависимости от содержания FeO, %: 1–10; 2–20; 3–30; 4–50

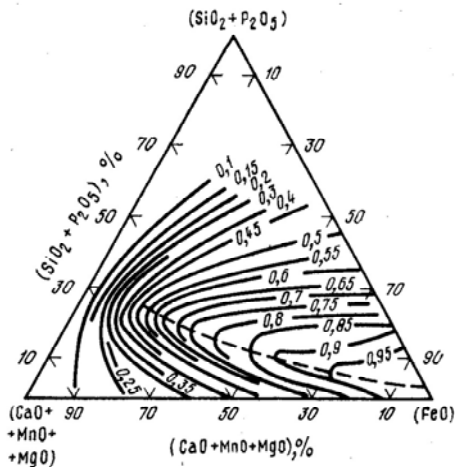


Рис. 2. Активность $a_{(FeO)}$ (цифры у кривых) в шлаковых системах

Контрольные вопросы:

1. От каких факторов зависит активность оксида железа.
2. Почему активность оксида железа в основных шлаках больше его концентрации.
3. В каких случаях можно пользоваться молекулярной теорией при расчетах активности FeO.
4. В каких случаях теория совершенных ионных растворов дает наиболее точные результаты.
5. В чем физический смысл ввода поправок при расчетах активности FeO по теории совершенных ионных растворов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Определение эффективности скачивания шлака при дефосфорации и десульфурации расплава стали в основной печи

Цель работы: изучить процессы десульфурации и дефосфорации металлической ванны, определить эффективность скачивания шлака в случае десульфурации и дефосфорации металла.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Десульфурация и дефосфорация металлической ванны

Для значительного улучшения физико-химических и служебных свойств углеродистых и легированных сталей необходимо наиболее полно удалять серу и фосфор при выплавке стали в сталеплавильных агрегатах с основной футеровкой и основными шлаками. Под влиянием фосфора значительно ухудшается пластичность стали. Особенно сильно это проявляется при низких температурах. При наличии в стали серы и ее соединений повышается склонность к образованию горячих трещин при прокатке и сварке (температура плавления сульфида железа 1193 °С), снижается сопротивляемость

коррозии, ударная вязкость, пластические свойства, ухудшаются электротехнические свойства.

В основном сталеплавильном шлаке в определенных количествах содержатся сульфиды кальция, марганца, магния, железа, алюминия и др. элементов. Между расплавом химически чистого железа и сульфидом железа существует неограниченная растворимость. Но в присутствии углерода и кремния она снижается. Сульфиды марганца и алюминия весьма мало растворяются в металле, а кальция и марганца – вообще практически не растворяются в расплаве стали.

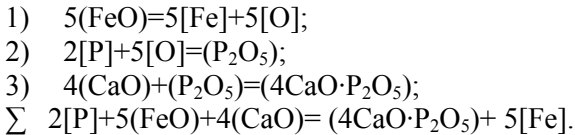
Сера характеризуется неограниченной растворимостью в жидком железе и очень малой растворимостью в твердом, поэтому она имеет высокую склонность к ликвации в слитках. При температуре 985 °С образуется эвтектика Fe-FeS (около 80%) которая ослабляет связь между зернами железа, что обуславливает хрупкость металла («красноломкость»). При обычных содержаниях серы в металле эвтектика может и не образовываться (даже при десятикратной степени ликвации), но возможно образование эвтектики FeO-FeS (если металл переокислен).

При низких температурах существуют фосфиды Fe₃P, Fe₂P, FeP и FeP₂. На диаграмме состояния сплавов Fe-P имеется максимум, свидетельствующий о том, что наиболее устойчивым в жидком металле является фосфид Fe₂P (21,8% P). Растворимость фосфидов велика в жидком железе и весьма мала в твердом, что приводит к образованию на границах зерен твердых фаз, вызывающих хрупкость металла при низких температурах (явление «хладноломкости»). При увеличении содержания алюминия в стали (до 0,05...0,1%) образуются прочные фосфиды AlP с температурой плавления около 1700 °С. Они кристаллизуются в первую очередь и поэтому выделяются не по границам зерен, а в их центрах. Этим отчасти объясняется благотворное влияние алюминия на свойства сталей, содержащих более 0,05 %P.

Процесс дефосфорации

Окисление фосфора протекает на границе металл-шлак, так как в объеме металла содержание кислорода в присутствии углерода всегда ниже равновесного с фосфором. Кроме того, фосфор является поверхностно активным элементом.

Используя для удобства молекулярную теорию, схему реакции окисления фосфора можно охарактеризовать следующими стадиями:



По данным Дж. Чипмена

$$\lg K_p = \lg \frac{a_{(4\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5)}}{[\%P]^2 a_{(\text{FeO})}^5 a_{(\text{CaO})}^4} = \frac{40067}{T} - 15,06 .$$

Отсюда можно определить равновесную концентрацию фосфора в металле.

В связи со сложностью расчетов активностей оксидов, входящих в выражение константы равновесия реакции фосфора, на практике часто используют коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом:

$$L_p = \frac{(\%P_2O_5)}{[\%P]} .$$

По ходу основной плавки его величина колеблется в пределах 50...500 в зависимости от (%FeO), основности шлака, температуры и степени приближения системы шлак-металл к равновесию

Определение параметров распределения фосфора между металлом и шлаком при равновесии реакций

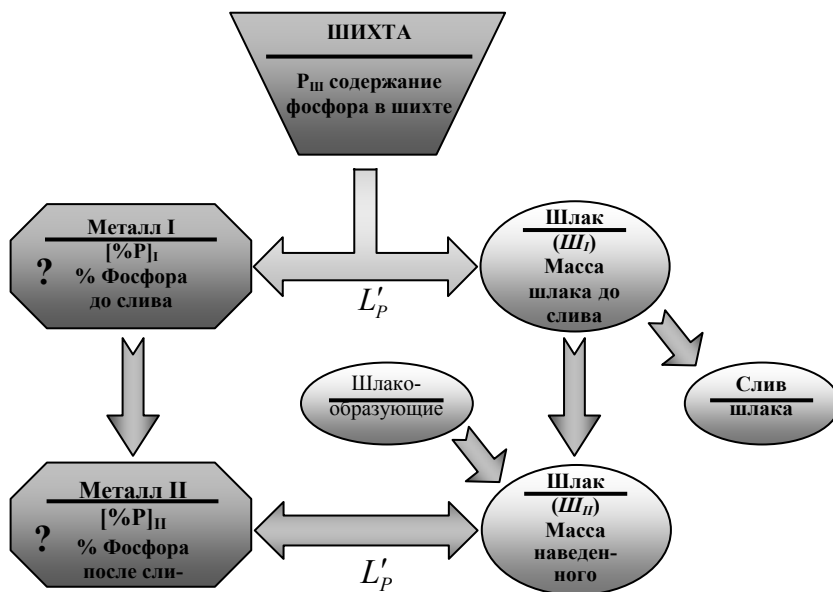


Рис. 1. Схема процесса дефосфорации

Содержание фосфора в металле перед спуском шлака вычисляют по формуле:

$$[\%P]_I = \frac{P_{Ш}}{1 + \frac{L'_P Ш_I}{100}},$$

где $P_{Ш}$ – общее количество фосфора в шихте (чугуне, скрапе, шлакообразующих материалах и твердых окислителях), % по массе металла.

$$L'_P = \frac{(\%P)}{[\%P]} = \frac{(\%P_2O_5)}{2,29[\%P]} = \frac{L_P}{2,29},$$

где L_P – коэффициент распределения фосфора между металлом и шлаком;

III_I – масса шлака до его спуска, % к массе металла.

Содержание фосфора в металле после спуска шлака и наводки нового шлака:

$$[\%P]_{II} = \frac{P_B}{1 + \frac{L'_P III_{II}}{100}} = \frac{[\%P]_I}{1 + \frac{L'_P III_{II}}{100}},$$

где III_{II} – масса наведенного шлака (после спуска первичного шлака), % к массе металла.

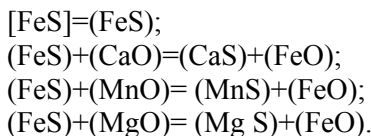
Содержание фосфора в металле без спуска шлака и наводке нового шлака:

$$[\%P] = \frac{P_{III}}{1 + \frac{L'_P (III_I + III_{II})}{100}}.$$

Процесс десульфурации

Сера обладает высокой химической активностью и образует сульфиды практически со всеми элементами Периодической системы Д.И. Менделеева.

Распространено мнение, что десульфурация протекает по следующим молекулярным реакциям, каждой из которых предшествует переход хорошо растворимого сульфида железа из металла в шлак:



Установлено, что из основных оксидов наиболее сильным десульфуратором является оксид кальция. Константа равновесия реакции $[\text{FeS}] + (\text{CaO}) = (\text{CaS}) + (\text{FeO})$

$$K_p = \frac{a_{(\text{CaS})} a_{(\text{FeO})}}{a_{[\text{FeS}]} a_{(\text{CaO})}}$$

По аналогии можно вычислить константы равновесия остальных реакций.

На практике для оценки десульфурующей способности шлака пользуются коэффициентом распределения серы между шлаком и металлом:

$$\eta_s = \frac{(\%S)}{[\%S]}$$

где $(\%S)$ и $[\%S]$ – общее содержание серы в шлаке и металле соответственно.

Конечное содержание серы в готовом металле можно рассчитать при известном значении η_s на основе баланса серы:

$$[\%S] = \frac{S_{ш} - S_{ск} \pm S_{г}}{1 + 0,01 III \eta_s}$$

где $S_{(i)}$ – количество серы, внесенной всеми шихтовыми материалами и добавками по ходу плавки; удаленной со скачаным шлаком и поглощенной из газовой фазы (+) или удаленной (–) в газовую фазу, % к массе металла; III – масса шлака, % к массе металла.

Роль скачивания шлака значительна при высоком η_s и несущественна, если его величина ≤ 3 . В этом коренное отличие роли спуска шлака при десульфурации по сравнению с дефосфорацией. Коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом часто на 1...2 порядка больше η_s . Поэтому даже при однократной смене шлака и меньшем его общем количестве резко увеличивается степень дефосфорации металла по сравнению с работой без скачивания шлака.

Определение параметров распределения серы между металлом и шлаком при равновесии реакций

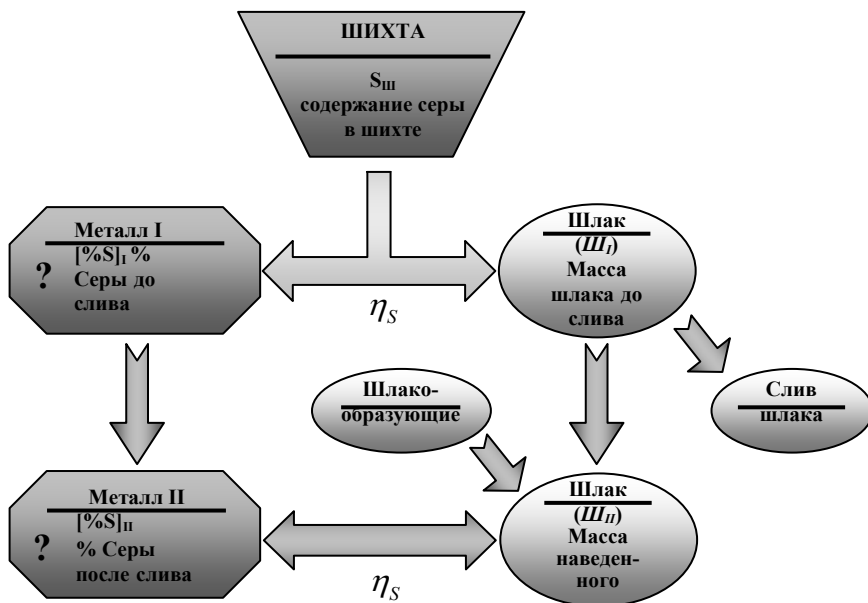


Рис. 2. Схема процесса

Содержание серы в металле перед спуском шлака определяют по формуле:

$$[\%S]_I = \frac{S_{Ш}}{1 + \frac{\eta_S \cdot Ш_I}{100}},$$

где η_S – коэффициент распределения серы между металлом и шлаком.

Содержание серы в металле после спуска шлака и наводки нового шлака:

$$[\%S]_{II} = \frac{[\%S]_I}{1 + \frac{\eta_S III_{II}}{100}}.$$

Содержание серы в металле без спуска шлака и наводке нового шлака:

$$[\%S] = \frac{S_{III}}{1 + \frac{\eta_S (III_I + III_{II})}{100}}.$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Рассчитать содержание фосфора и серы в металле при равновесии со шлаком (исходные данные взять из таблицы 1):

$[\%P]_I$ $[\%S]_I$ – до слива шлака; $[\%P]_{II}$ $[\%S]_{II}$ – после слива шлака;
 $[\%P]$ $[\%S]$ – без слива шлака.

2. Рассчитать относительную эффективность дефосфорации и десульфурации металла δ_P и δ_S по формуле:

$$\delta_P = \frac{[\%P] - [\%P]_{II}}{[\%P]} \cdot 100\%,$$

$$\delta_S = \frac{[\%S] - [\%S]_{II}}{[\%S]} \cdot 100\%.$$

3. Рассчитанные значения занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета дефосфорации и десульфурации стали

№ п/п	Коэффициент распределения		Масса шлама, %		Общее количество в шихте, % к массе металла		Содержание фосфора в металле (со спуском шлама и без спуска)			Содержание серы в металле (со спуском шлама и без спуска)		
	L'_p	η_S	Ш _I	Ш _{II}	$P_{ш}$	$S_{ш}$	[%P] _I	[%P] _{II}	[%P]	[%S] _I	[%S] _{II}	[%S]
1	70	6,0	6,0	6,0	0,30	0,07						
2	50	4,0	5,0	6,0	0,40	0,06						
3	60	4,0	6,0	7,0	0,50	0,05						
4	50	3,0	5,0	6,0	0,30	0,04						
5	100	4,0	6,0	5,0	0,20	0,04						
6	150	10	6,0	6,0	0,25	0,07						
7	120	8,0	5,0	5,0	0,35	0,06						
8	100	6,0	5,0	5,0	0,40	0,08						
9	70	5,0	6,0	6,0	0,35	0,06						
10	50	3,0	5,0	6,0	0,25	0,04						
11	40	2,5	6,0	5,0	0,30	0,05						
12	40	2,0	5,0	5,0	0,25	0,04						
13	30	2,0	6,0	6,0	0,20	0,05						
14	25	1,5	7,0	6,0	0,15	0,06						
15	25	1,5	5,0	5,0	0,20	0,07						

Контрольные вопросы:

1. Влияние серы и фосфора на свойства стали.
2. Укажите благоприятные условия для удаления фосфора из металла.
3. Укажите благоприятные условия для удаления серы из металла.
4. Что такое коэффициент распределения.
5. От каких факторов зависит эффективность скачивания шлама.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение равновесных коэффициентов распределения серы между шлаком и металлом

Цель работы: изучить законы распределения веществ в различных фазах, определить равновесный коэффициент распределения серы между металлом и шлаком.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Сера – вредная примесь, способствующая красноломкости, ухудшению свариваемости, снижению пластичности, т.е. ухудшению качества стали. Для рядовых марок стали допускается не более 0,05...0,06 %, а для качественных 0,02...0,03 % серы. Так как содержание серы в шихте обычно выше, чем допускается в готовой стали, то это приводит к необходимости удаления ее из металла в шлак.

Количество серы удаленной из металла в шлак зависит от коэффициента распределения серы между металлом и шлаком в условиях равновесия.

Закон распределения

При равновесии системы отношение концентраций вещества, растворенного в двух соприкасающихся несмешивающихся фазах, величина постоянная при постоянной температуре (Закон Нернста 1890).

$$\frac{C_{AI}}{C_{AII}} = L_A \cdot \quad (1)$$

Равновесным коэффициентом распределения серы между металлом и шлаком называется отношение процентного содержания серы в шлаке и в металле $\eta_S = \frac{[\%S]}{[\%S]}$ после достижения химического равновесия.

Влияние химического состава шлака на η_S было исследовано Дж. Чипменом после достижения равновесия на плавках, проведенных в индукционной печи под нейтральной атмосферой. В результате анализа полученных данных была установлена прямолинейная зависимость η_S от избытка основных оксидов в шлаке $n_{изб}$, молей на 100 г шлака.

Зависимость влияния избытка основных оксидов на коэффициент распределения серы при температуре 1580...1650 °С можно представить в виде формулы:

$$\text{Если } n_{изб} > -0,05 \quad \eta_S = 1,4 + 16 \cdot n_{изб}, \quad (2)$$

$$\text{Если } n_{изб} \leq -0,05, \quad \text{то } \eta_S = 0,5,$$

$$\text{где } n_{изб} = (n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO}) - (2n_{SiO_2} + 4n_{P_2O_5} + 2n_{Al_2O_3} - n_{Fe_2O_3}).$$

Число молей каждого оксида на 100 г шлага:

$$n_{CaO} = \frac{(\%CaO)}{56}, \quad n_{SiO_2} = \frac{(\%SiO_2)}{60} \quad \text{и т.д.}$$

Как следует из уравнения (2), при расчете по формуле Чипмена связь η_S с содержанием (FeO) не установлена. Существуют и другие эмпирические уравнения, основанные на молекулярной теории, например, А.Н. Морозова и Даркена-Ларсена, а также уравнения, основанные на ионной теории шлаков, которые учитывают содержание (FeO).

Кроме расчетных формул, можно использовать графики, основанные на данных производственных плавок (рис. 1).

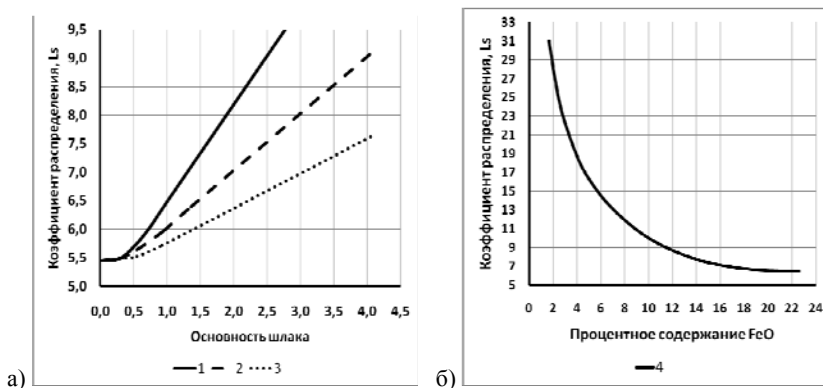


Рис. 1. Влияние основности шлага (а) (при процентном содержании FeO равном 10%) и содержания в нем оксида железа (II) (б) (при основности равной 3,5) на коэффициент распределения серы L_S : 1, 4 – гомогенный шлаг; 2 – гетерогенный шлаг нормальной текучести; 3 – очень вязкий гетерогенный шлаг

Для определенных условий при крайне низких значениях FeO величина коэффициента распределения может составлять несколько сотен единиц.

При высокой основности шлака наиболее высокие значения коэффициентов распределения серы достигаются в условиях доменной плавки. При содержании (FeO) 0,1 – 0,2 % коэффициент распределения серы между шлаком и металлом может достигать 100 и более.

Достаточно высокие для эффективной десульфурации металла значения коэффициентов распределения серы могут быть получены при содержании (FeO) до 1,0 – 1,5% в восстановительном периоде электроплавки.

В мартеновском и кислородно-конвертерном процессах, а также в окислительном периоде плавки в дуговых электросталеплавильных печах, значения коэффициентов распределения серы минимальны и обычно не превышают 10.

Как следует из рисунка 1 на коэффициент распределения значительное влияние оказывает вязкость шлака, поэтому для оценки коэффициента распределения необходимо определить вязкость шлака.

Факторы, влияющие на вязкость шлаков.

Вязкость гомогенного (физически однородного) шлака непрерывно снижается с ростом его основности B . Вязкость гетерогенного шлака растет с увеличением основности B , что обусловлено повышением количества нерастворенных в шлаке частиц извести. При наличии гетерогенных шлаков повышение B неэффективно для удаления из металла серы и фосфора (степень десульфурации и дефосфорации металла оказывается значительно ниже теоретически возможной, которая достигается лишь при наличии гомогенного шлака). Повышение температуры и присадка раскислителей (бокситов, плавикового шпата, окалины) снижают вязкость шлака и увеличивают оптимальный верхний предел его основности, что способствует растворению в шлаке твердых частиц оксидов кальция и магния.

Резкое увеличение вязкости шлака (рис. 2) наблюдается при температуре, близкой к точке ликвидуса, когда увеличивается количество микро- и макрокристаллов в шлаке.

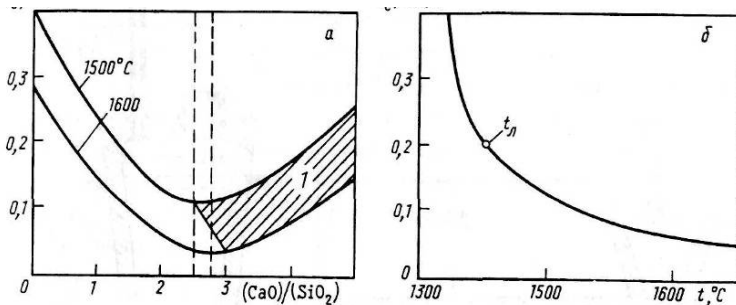


Рис. 2. Схема влияния основности (а) и температуры (б) шлака на его вязкость в Па·с:

$t_{л}$ – температура ликвидуса; 1 – область гетерогенных шлаков

Минимальная вязкость шлака обычно обеспечивается при основности $(CaO/SiO_2) \sim 2$. Однако за счет увеличения степени перегрева шлака над линией ликвидуса, достигаемого повышением температуры и добавкой разжижителей, можно получить жидкоподвижные шлаки при основности 3 и выше.

Определение текучести жидкого шлака и его вязкости производится различными способами. Наиболее простыми из них являются способы, осуществляемые при помощи приборов представленных на рис. 3.

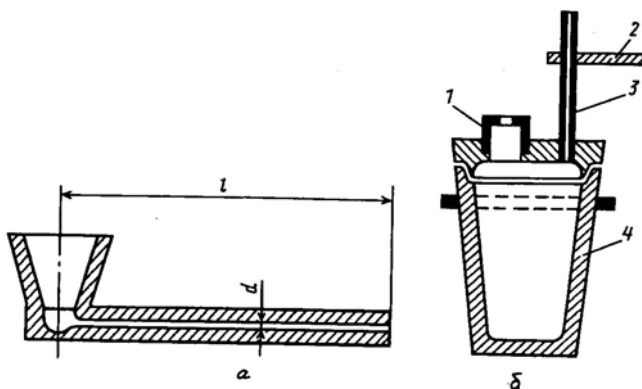


Рис. 3. Приборы для измерения текучести жидкого шлака:

а – вискозиметр Герти; б – вискозиметр погружения;

1 – тигель с отверстием 9 мм; 2 – шайба для определения глубины погружения стакана; 3 – трубка для выхода воздуха; 4 – стакан

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Ознакомиться с методиками отбора проб металла и шлака и замера температуры в реальных металлургических агрегатах.

2. Рассчитать коэффициент распределения серы между металлом и шлаком по формуле Чипмена и используя рисунки 1 и 2.

Таблица 1 – Исходные данные

№ вар	Температура шлака	Состав шлака, % (масс.)						
		CaO	MgO	MnO	FeO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃
1	1580	45	10	10	12	15	3	5
2	1650	48	10	10	9	20	3	5
3	1633	44,5	2,7	5,1	17,9	21,3	0,6	1,2
4	1720	40,7	3,7	6,4	20	21	0,6	1,1
5	1580	47,1	3,4	1,9	23,8	17,3	0,6	1,9
6	1610	49,1	3,4	1,8	23,9	16,3	0,5	1,5
7	1590	48,1	3,5	1,7	23,7	16,7	0,6	1,1
8	1670	46,5	2,6	5,1	18	21,3	0,6	1,2
9	1620	52,7	3,7	3,5	21	21,1	0,6	1,0
10	1630	53,1	2,4	1,7	21,7	15,3	0,6	0,9
11	1610	45,1	3,3	1,7	23,8	14,3	0,7	0,9
12	1600	51,1	2,3	1,7	22,7	14,7	0,6	0,9
13	1490	47	10	10	7	20	3	5
14	1580	45	0,5	1	10	35	3	5
15	1650	41	1	2	10	30	3	5
16	1633	40	1	2	10	28	0,6	1,2
17	1720	40,7	1	1	10	29	0,6	1,1
18	1580	47,1	1	2	10	26	0,6	1,9
19	1610	49,1	1	1	10	29	0,5	1,5
20	1590	48,1	1	2	10	31	0,6	1,1
21	1670	46,5	1	2	10	32	0,6	1,2
22	1620	52,7	2	2	10	27	0,6	1,0

Кроме того в состав шлака входят Cr₂O₃, сера и др.

3. Проанализировать состав металла и шлака и значения коэффициента распределения серы, используя данные проб металла и шлака.

Химический состав металла и шлака некоторых плавов в электродуговой печи емкостью 100 т. (определялись при отборе пробы ЦЗЛ РУП БМЗ).

Таблица 2 – Металл из печи (% по массе)

Плавка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	O
33300 ст2с45	0,216	0,028	0,072	0,015	0,098	0,090	0,110	0,0323
33301 стFe60	0,235	0,024	0,104	0,018	0,078	0,120	0,105	0,0389
33444 ст80к	0,049	0,000	0,030	0,000	0,014	0,002	0,016	0,0600
33445 ст80к	0,255	0,000	0,024	0,002	0,015	0,012	0,020	0,0317

Таблица 3 – Шлак из печи (% по массе)

Плавка	CaO	SiO ₂	FeO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	S	T, K
33300 ст2с45	44,50	21,33	17,95	2,64	0,565	5,14	0,910	0,070	1906
33301 стFe60	40,75	21,06	20,02	3,71	0,631	6,46	1,254	0,065	1990
33444 ст80к	47,10	17,3	23,78	3,36	0,581	1,76	0,247	0,015	1854
33445 ст80к	48,3	17,6	24,00	3,60	0,500	1,60	0,050	0,040	1922

4. Сделать выводы по работе

Контрольные вопросы:

1. Каковы возможные значения величин коэффициентов распределения серы между металлом и шлаком в сталеплавильных процессах.
2. Какова зависимость коэффициента распределения серы от основности шлака.
3. Какова зависимость коэффициента распределения серы от содержания FeO.
4. Какова зависимость коэффициента распределения серы от температуры и вязкости шлака

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Технологии восстановления железа из руд в шахтных печах

Цель работы: Изучить основные характеристики технологий восстановления железа из руд. Определить параметры процесса восстановления железа на примере восстановления в противоточной шахтной печи при помощи водорода.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

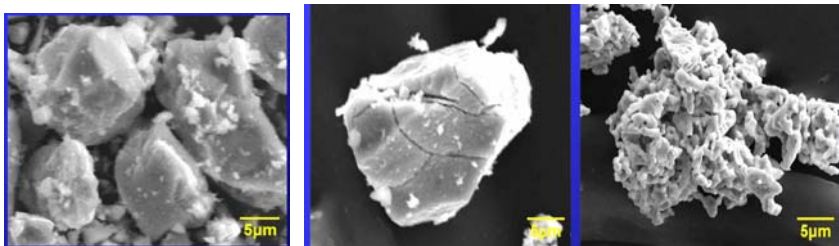
Существует несколько основных способов восстановления железа: в кипящем слое, во вращающихся печах, в ретортах, в шахтных печах и при плавлении сырья. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки, и область применения.

Необходимо отметить, что на долю процессов основанных на восстановлении железа в шахтных печах приходится более 80 % всего производства металлизированного сырья в мире.

Наиболее распространены две технологии восстановления железа в шахтных печах – Midrex и Hyl (Energiron). Основное различие их состоит в использовании различного соотношения CO и H₂ в восстановительном газе и различном давлении в шахте, что влияет на производительность установки при неизменных габаритных размерах.

Теоретические основы восстановления железа в шахтных печах с получением твердого продукта

На рис. 1 представлен процесс восстановления губчатого железа из оксидов железа.

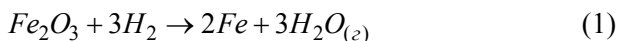


Исходные оксиды —> 32 % металлизации —> 100 % металлизации

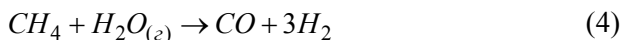
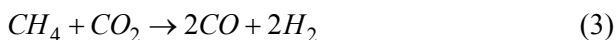
Рис. 1. Процесс восстановления губчатого железа из оксидов

Большая часть процессов получения металлizedованного сырья основана на реакциях (1)-(6), из которых основными являются реакции восстановления железа (1) и (2). В зависимости от того какая реакция (3) или (4) получения восстановительного газа преобладает, будут видоизменяться и технологические процессы, которые были предложены различными фирмами и являются торговыми марками (например Midrex и Hyl (Energiron)). В настоящее время большое внимание уделяют также реакциям науглероживания железа (5) и (6), так как это естественный способ защиты металлizedованного сырья от дальнейшего окисления на воздухе (при транспортировке и складировании).

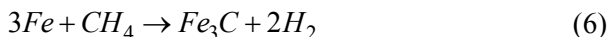
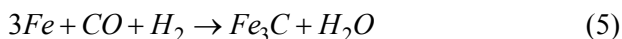
Реакции восстановления железа



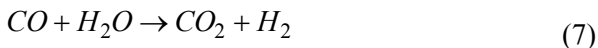
Реакции реформинга (конверсии) природного газа



Реакции науглероживания



Реакции конвертирования восстановительных газов



Помимо восстановительной способности, газы должны обладать избыточной энергией, требуемой для поддержания необходимой температуры в рабочих зонах установки в условиях протекания эндотермических реакций.

Для полного восстановления железа по реакции $Fe_2O_3 + 3H_2 = 2Fe + 3H_2O$ необходимо затратить 195 ккал/кг (Fe) или 816,7 кДж/кг (Fe) теплоты.

Скорость потока газов должна быть ниже критической скорости начала образования кипящего или фонтанирующего слоя. Восстановление кусков руды размером более 20 мм можно вести со скоростью газа до 40 м/с. При таких скоростях газа процессы восстановления ограничиваются по производительности только кинетическими факторами и теплопередачей.

Теоретически необходимое количество восстановителя и топлива не является достаточным для вывода о возможности осуществления того или иного способа восстановления, важным вопросом является обеспечение технологией и оборудованием необходимой производительности (определяется интенсивностью тепло- и массообмена и размерами установки металлизации (количеством модулей)) и капитальными затратами на оборудование, а также дополнительными затратами энергетических и материальных ресурсов (электрическая энергия на привод газодувок и вентиляторов, топливо на поддержание необходимой температуры реакции, подача и подготовка воды и т.д.)

Основными характеристиками процессов восстановления являются:

- 1) Степень восстановления R (отношение количества отнятого кислорода к общему количеству кислорода, связанного с железом;
- 2) Скорость реакции восстановления при определенной степени восстановления $\left[\frac{dR}{d\tau} \right]_R$, с^{-1} ;
- 3) Относительная скорость восстановления V , с^{-1} ;
- 4) Равновесная концентрация H_2O , $K_{\text{равн}}$;
- 5) Температуры в зонах реактора T , $^{\circ}\text{C}$;
- 6) Удельная производительность реактора q , $\text{т Fe}/(\text{м}^3 \cdot \text{сутки})$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание: Определить конструктивные и технологические параметры шахтной печи для восстановления железа.

Исходные данные:

Восстановительная шахта с поперечным сечением F и высотой H загружается сверху Fe_2O_3 окатышами, которые после окончания

процесса выдаются из реактора снизу (рис. 1). В качестве восстановительного газа служит водород, который поднимается снизу вверх через шихту по принципу противотока.

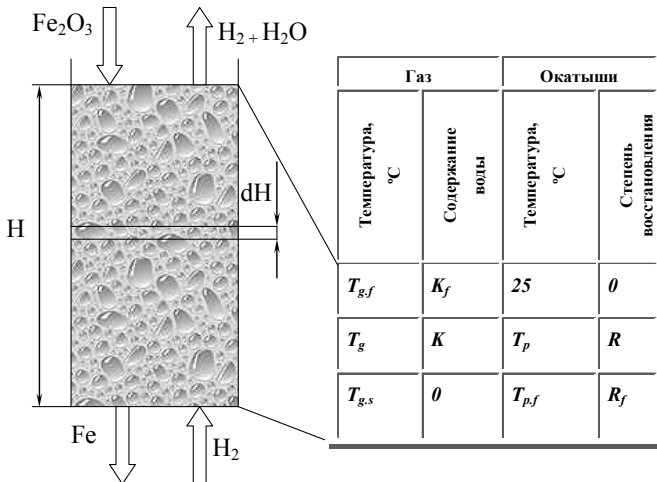


Рис. 1. Расчетная схема шахтной печи для восстановления железа из окисленных окатышей

Температура восстановительного газа (водорода) на входе в реактор $T_{g,s}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание водорода на входе в реактор **100%**. Восстановленный продукт (железная губка) отводится от реактора снизу при температуре $T_{p,f}$ при степени восстановления R_f . Шахта разделена на зоны, высота которых соответствует выбранной заранее величине падения температуры газа в каждой из них.

Для упрощения расчетов принимаем режим, при котором разность температур газа и шихты в восстановительной зоне пренебрежимо мала.

В качестве шихты принимаем Fe_2O_3 окатыши диаметром 3 см и насыпной плотностью $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,3\text{ т/м}^3$ (с плотностью железа $\rho_{\text{Fe}_n}=1,61\text{ т/м}^3$) с количеством пустой породы равном 1,5%.

Исходные данные по расходу восстановительного газа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расход восстановительного газа

№ варианта	$V_{\text{газа}},$ $\text{м}^3(\text{H}_2)/\text{кг}(\text{Fe})$	№ варианта	$V_{\text{газа}},$ $\text{м}^3(\text{H}_2)/\text{кг}(\text{Fe})$
1	2,0	14	2,1
2	2,3	15	2,4
3	2,5	16	2,7
4	3	17	3,2
5	3,5	18	3,8
6	4	19	4,3
7	4,5	20	4,8
8	5	21	5,3
9	5,5	22	5,7
10	6	23	6,8
11	6,2	24	7,3
12	6,5	25	7,6
13	7	26	8

Порядок расчета:

Разбиваем высоту шахты на зоны: 1, 2, 3, 4 (от количества зон зависит точность использования рисунка 2 и итоговая точность расчета. Так как при расчетах принят ряд упрощений, то достаточно использовать 4 зоны).

Принимаем, что нагрев продукта (окатышей или руды) по зонам осуществляется в следующей пропорции: $\Delta T_{p1} = 100^\circ\text{C}$, $\Delta T_{p2} = 200^\circ\text{C}$, $\Delta T_{p3} = 300^\circ\text{C}$ и $\Delta T_{p4} = 400^\circ\text{C}$ (можно выбирать и другие соотношения температур от начальной – 0 (20) $^\circ\text{C}$ до конечной – 1000 $^\circ\text{C}$).

Принимаем, что энергия, затраченная на восстановление продукта одинакова по зонам и составляет $Q = 816700/n$ (n – число зон). Например, для 4-х зон $Q_R = 816700/4 = 204175$ Дж. Определяем теплоту, затраченную на нагрев продукта Q_D для каждой из зон по формуле

$$Q_p = m_p \cdot \Delta T_p \cdot C_p$$

$$Q_{p1} = 1 \cdot 100 \cdot 1200 = 120000 \text{ Дж} \quad Q_{p2} = 1 \cdot 200 \cdot 1200 = 240000 \text{ Дж и т.д.}$$

C_p продукта составляет около 85 % от теоретического значения для Fe_2O_3 , т.е. в среднем она достаточно велика. Fe_2O_3 присутствует лишь в верхней части шахты, а ниже имеется преимущественно восстановленное железо. Это несоответствие сглаживает не учитываемые тепловые потери реактора.

Согласно формуле $\Delta T_g = \frac{Q_p + Q_R}{V_g \cdot C_g}$ определяем изменение температуры

газа в каждой зоне (в данной работе изменением теплоемкости газа при изменении температуры и состава газа пренебрегаем).

$$\Delta T_{g1} = \frac{Q_{p1} + Q_R}{V_g \cdot C_g} = \frac{120000 + 204175}{2,5 \cdot 1382} = 94 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Далее, делая расчет для каждой из зон, следуем приведенному ниже алгоритму

Зона № 1 (первая снизу шахты):

1) Задаем условия противотока

$$\Delta T_{p1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}, T_p = 900 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 1000 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{g1} = 1000 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow T_x \text{ }^\circ\text{C}, T_x = T_{g1} - \Delta T_{g1} = T_{g2} \text{ }^\circ\text{C};$$

2) Вычисляем средние температуры газа и продукта на участке

$$\bar{T}_g = \frac{T_g + T_x}{2} = \frac{1000 + 906}{2} = 953 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\bar{T}_p = \frac{900 + 1000}{2} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$$

3) Вычисляем возможное увеличение степени восстановления для текущей зоны (100% восстановления соответствует затрате 816,7 кДж/кг Fe).

$\Delta R = \frac{Q_R}{Q_{R100\%}}$, $\Delta R = \frac{204,175}{816,7} = 0,25$ (I зона от 75 % до 100 %, II зона от 50 % до 75 % и т.д.)

4) Вычисляем повышение содержания H_2O в газе

$$\Delta K = \frac{\Delta R \cdot 0,430 \cdot 22,4}{16 \cdot V_g}$$

5) Вычисляем средние значения величин для зоны

$$\bar{R} = (75+100)/2=87,5 \quad \bar{T} = \bar{T}_p \quad \bar{K} = (K_1 + K_2)/2$$

$$K_n = K_{n-1} + \Delta K$$

6) Используя рисунок и таблицу, по средним значениям величин вычисляем скорость восстановления

$$\frac{dR}{d\tau} = v \cdot [K_{равн} - \bar{K}], \text{ с}^{-1}$$

где v – относительная скорость восстановления, сек^{-1} ;

$K_{равн}$ – равновесная концентрация H_2O (объемные доли);

\bar{K} – концентрация H_2O в свободном пространстве, занятом газом.

7) В последней зоне необходимо учитывать, что восстановление фактически протекает при температурах от 400 °С, поэтому расчет скорости восстановления проводим при температуре 400 °С. При этом к результату расчета времени восстановления необходимо добавить время нагрева продукта до 400 °С, которое зависит от расхода газа и его температуры. Для этого необходимо использовать второе приближение с составлением модели с учетом теплопередачи (для первого приближения принимаем время нагрева до 400 °С для граничных расходов при $V_g = 2,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ равным 1800 секунд, а для $V_g = 8 \text{ м}^3/\text{кг}$ равным 1000 секундам).

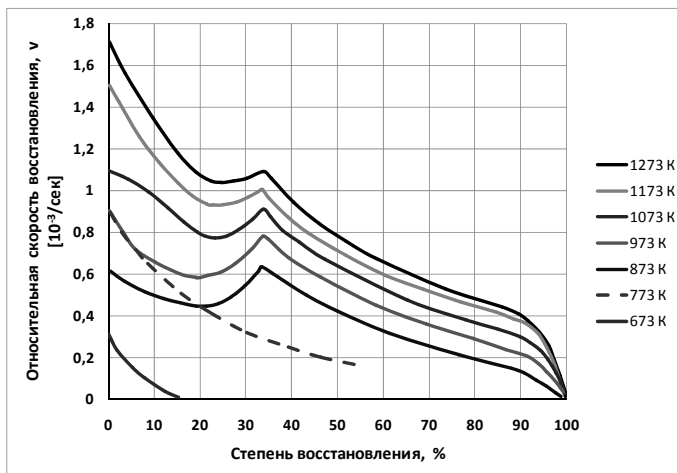


Рис. 2. Относительная скорость восстановления гематитовых окатышей (диаметр 31 мм, пористость 19%) в чистом водороде (температура является средней температурой окатышей) в зависимости от степени восстановления

Таблица 2 – Практические приближенные значения $K_{равн}$ для равновесия восстановления руды водородом в зависимости от степени восстановления

Температура газа, °С	Максимальное использование H_2	
	$K_{равн} = \frac{[\%H_2O]}{[\%H_2] + [\%H_2O]}$	
	<i>Для $R \leq 0,3333$</i>	<i>Для $R \geq 0,3333$</i>
900	$1-1,892 \cdot R$	0,370
800	$1-1,981 \cdot R$	0,340
700	$1-2,130 \cdot R$	0,290
600	$1-2,298 \cdot R$	0,235
	<i>Для $R \leq 0,111$</i>	<i>Для $R \geq 0,111$</i>
500	$1-7,70 \cdot R$	0,145
400	$1-8,02 \cdot R$	0,110

8) Вычисляем необходимое время пребывания шихты в зоне

$$\tau_i = \frac{\Delta R}{dR/dt}$$

9) Полученные результаты заносим в таблицу

Таблица 3 – Результаты расчета основных параметров процесса восстановления железа водородом в шахтной печи

№ зоны	$T_{г}, ^\circ\text{C}$	$T_{п}, ^\circ\text{C}$	K	R	$\tau, \text{с}$
	<i>средние значения для зон</i>				
1					
...					
n					
					Всего τ

10) Определяем удельную производительность реактора

$$q = \frac{\rho_{Fe_н} \cdot 24}{\tau}, [\text{т Fe}/(\text{м}^3 \cdot \text{сутки})],$$

где $\rho_{Fe_н}$ – насыпная плотность окатышей в пересчете на железо т Fe/м³ (1,61 т/м³);

τ – время пребывания в шахте, ч.

Контрольные вопросы:

1. Основные способы восстановления железа.
2. Основные реакции, протекающие в технологических процессах восстановления железа газами.
3. Требования, предъявляемые к работе установок по восстановлению.
4. Принцип противотока и его реализация.
5. Основные характеристики процессов восстановления.
6. Изобразите зависимость относительной скорости восстановления гематитовых окатышей в чистом водороде от степени восстановления для различной температуры.
7. Почему на практике степень восстановления, как правило, меньше 100 %.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Перемешивание и дегазация стали при продувке нейтральным газом

Цель работы: Изучить один из способов гомогенизации и дегазации стали, заключающийся в продувке расплава нейтральным газом. Определить время полного перемешивания продувкой, обеспечивающей гомогенизацию расплава и время продувки с целью частичного удаления водорода.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Продувку стали производят с целью гомогенизации расплава, усреднения температуры, удаления газов и неметаллических включений.

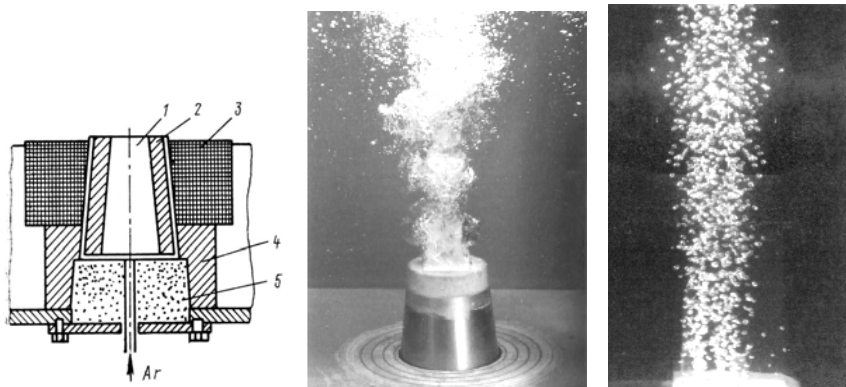


Рис. 1. Схема ввода инертного газа в ковш через пористую пробку:
1 – пробка; 2 – наружная втулка; 3,4 – гнездовые блоки из высокоглиноземистого кирпича; 5 – периклазовая набивка

Гомогенизация расплава

В процессе продувки стали в ковше происходит выравнивание содержания отдельных элементов в объеме металла, т.е. его гомогенизация. Это имеет большое значение для повышения качества, так как присаживаемые в ковш во время выпуска раскислители и легирующие добавки распределяются неравномерно. По высоте ковша

разница в содержании таких элементов, как кремний и марганец, может достигать 0,05–0,15% абс. После продувки стали инертным газом эта разница не превышает 0,01–0,03%.

На основании исследования поведения металла при продувке в различных агрегатах, предложена следующая зависимость времени τ (с), необходимого для достижения 95%-й гомогенизации, от параметров продувки как функции диссипации (рассеяния) энергии ε

$$\tau = 650 \cdot \varepsilon^{-0,4}, \quad (1)$$

где ε – функция диссипации энергии (мощность перемешивания), кВт/т;

$$\varepsilon = 6,18 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{V_{Ar} \cdot T}{G_{ст}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho \cdot g \cdot H}{P} \right), \quad (2)$$

где V_{Ar} – расход газа (аргона) на продувку, м³/мин;

T – температура металла, К;

$G_{ст}$ – масса металла, т;

ρ – плотность расплава, кг/м³ (7000 кг/м³);

H – высота слоя металла над продувочной фурмой, м;

g – гравитационное ускорение, м/с²;

P – давление поступающего газа, Па (10⁵ Па).

Уравнение (2) описывает мощность диссипации при всплывании газовых пузырей, что наблюдается при продувке через пористые пробки, когда кинетическая энергия газа, поступающего в металл, невелика.

При продувке нейтральным газом в ковше образуется газометаллическая эмульсия. В связи с ограниченностью объема ковша расход нейтрального газа ограничен.

Максимально возможный расход аргона составляет:

$$V_{Ar}^{max} = (0,1 \dots 0,15) \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{1000}{\rho_{ст}} \cdot \frac{60}{H/W} \cdot G_{ст},$$

где H – глубина погружения фурмы, м;

W – скорость всплывания пузырей (принимается 0,3 м/с).

Дегазация расплава

Играя роль вакуумных пустот (парциальное давление удаляемого газа в пузырьке изначально равно нулю), пузырьки инертного газа в процессе продувки экстрагируют из жидкой стали водород и другие газы.

В условиях равновесия распределение водорода между металлом и пузырьками определяется законом Сиверса:

$$[H] = K \sqrt{P_{H_2}}.$$

Предполагая, что этот закон соблюдается (достигается равновесие), получено уравнение для определения необходимого количества инертного газа с целью определенной дегазации (m^3/t):

$$V = \frac{2240}{M} \cdot K^2 \cdot P \cdot \left(\frac{1}{[c]_к} - \frac{1}{[c]_н} \right) + ([c]_к - [c]_н),$$

где M – молекулярная масса удаляемого газа (для водорода $M = 2,016$);

K – константа равновесия реакции растворения (водорода);

P – давление над расплавом, МПа;

$[c]_н$ и $[c]_к$ – начальное и конечное содержание удаляемого газа, %.

Константа равновесия реакции растворения водорода:

$$\lg K_H = -\frac{1900}{T} - 1,577.$$

Время перемешивания, мин

$$\tau = \frac{V \cdot G_{ст}}{V_{Ar} \cdot k},$$

где k – степень приближения к равновесию ($k = 0,7 - 0,8$).

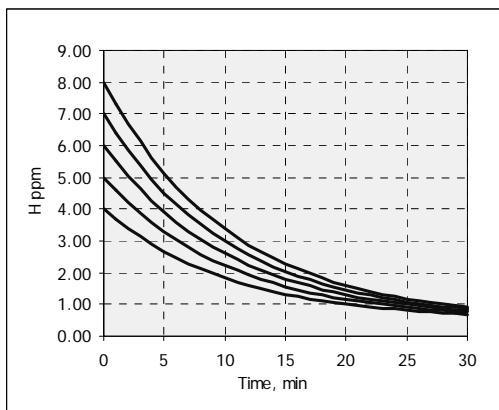


Рис. 2. Зависимость содержания водорода при дегазации от времени при различном его начальном содержании в расплаве

Удаление неметаллических включений

Флотация неметаллических включений и удаление их из жидкой стали при продувке инертным газом происходят в результате прилипания их к газовым пузырькам и подъема вместе с ними. При прохождении пузырьков через слой или пленку шлака эти включения растворяются в шлаке.

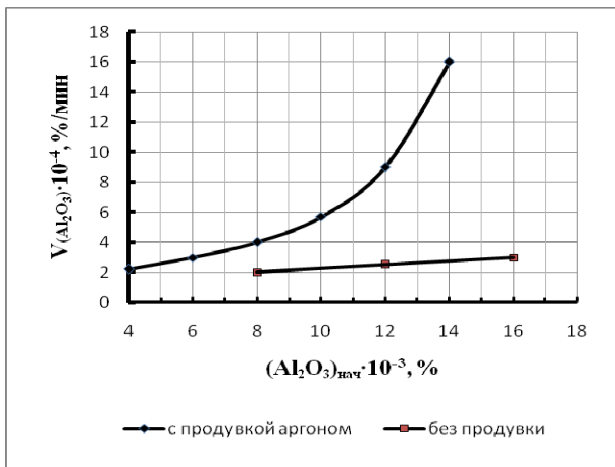


Рис. 3. Зависимость скорости изменения содержания Al_2O_3 в стали от его начального содержания с использованием и без использования продувки

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1) Изучить продувку через различные фурмы и пористые пробки на лабораторной установке, имитирующей реальные металлургические агрегаты.

2) Ввести индикаторное вещество и наблюдать гомогенизацию в жидкости с контролем времени

3) Ввести порошкообразные материалы малой плотности и наблюдать их всплывание с продувкой и без продувки жидкости в емкости.

4) Определить время полного перемешивания τ , обеспечивающего гомогенизацию расплава при заданном расходе V_{Ar} и максимально допустимом расходе V_{Ar}^{max} инертного газа.

5) Определить время перемешивания для получения необходимого снижения концентрации водорода в расплаве (с $26 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла или **0,00234 %** до $17 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла или **0,0015 %**).

6) Произвести оценку скорости изменения содержания неметаллических включений (Al_2O_3) с продувкой и без и количества неметаллических включений в виде Al_2O_3 после обработки в ковше с использованием продувки и без нее за время определенное в п. 2 (начальное содержание Al_2O_3 ($C_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, %) приведено в таблице исходных данных).

Таблица 1 – Исходные данные

№ вар	$G_{ст}$, тонн	V_{Ar} , м ³ /мин	T , К	H , м	P , МПа	$C_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{\text{Al}}$, %
1	50	0,38	1883	2,2	0,1	0,013
2	50	0,41	1880	2,2	0,1	0,014
3	50	0,45	1873	2,2	0,1	0,012
4	80	0,6	1873	2,8	0,1	0,011
5	80	0,65	1883	2,8	0,1	0,013
6	80	0,7	1880	2,8	0,1	0,012
7	100	0,8	1876	3,1	0,1	0,015
8	100	0,82	1882	3,1	0,1	0,014
9	100	0,86	1871	3,1	0,1	0,012

10	160	1	1873	3,5	0,11	0,013
11	160	1,1	1876	3,5	0,09	0,011
12	160	1,15	1882	3,5	0,08	0,012
13	250	1,25	1876	4	0,1	0,013
14	250	1,28	1882	4	0,1	0,014
15	250	1,3	1871	4	0,1	0,012
16	330	1,4	1871	4,4	0,1	0,012
17	330	1,45	1880	4,4	0,08	0,013
18	330	1,5	1882	4,4	0,07	0,014
19	480	1,65	1876	4,9	0,1	0,010
20	480	1,7	1882	4,9	0,1	0,014
21	480	1,74	1871	4,9	0,1	0,012

Контрольные вопросы:

1. Какими способами осуществляется продувка расплава газами.
2. Какие функции выполняет продувка расплава.
3. Сравните величины, полученные при расчете времени для обеспечения различных функций.
4. Изобразите зависимость содержания водорода при дегазации от времени при различном его начальном содержании.
5. Изобразите зависимость скорости изменения содержания неметаллических включений (Al_2O_3) в стали от его начального содержания с использованием и без использования продувки.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П1 – Стандартные энтальпии образования и стандартные энтропии некоторых веществ*

Вещество	Состояние	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль·К)
Al	к	0	28,35
Al ₂ O ₃	к	- 1676	50,92
С (графит)	к	0	5,74
С (алмаз)	к	1,897	2,38
СО	г	- 110,5	197,5
СО ₂	г	- 393,5	213,7
СН ₄	г	- 74,86	186,19
Са	к	0	41,62
СаО	к	- 635,5	39,7
СаF ₂	к	- 1214,0	68,87
СаS	к	-476,98	56,61
СаСО ₃ (кальцит)	к	- 1206,0	92,9
Со	к	0	30,04
СоО	к	-238,9	52,7
Сr	к	0	23,76
Сr ₂ O ₃	к	- 1141,0	81,1
Сu	к	0	33,15
Сu	г	339,32	166,27
Сu ₂ O	к	- 167,36	93,93
СuO	к	- 162	42,63
Fe	к	0	27,15
FeO	к	- 264,8	60,75
Fe ₂ O ₃	к	- 822,2	60,75
Fe ₃ O ₄	к	- 1117,1	146,2
FeS	к	- 100,4	60,29
FeS ₂ (пирит)	к	- 163,2	52,93
H ₂	г	0	130,52
H ₂ O	г	- 241,84	188,74
H ₂ O	ж	- 285,84	69,96
Mg	к	0	32,55
MgO	к	- 601,24	26,94
MgCO ₃	к	- 1096,21	65,69
Mn	к	0	32

MnO	к	-385,1	61,5
MnS	к	-214,35	80,75
Mo	к	0	28,62
MoO ₂	к	-589,1	46,28
Na	к	0	51,42
Na ₂ O	к	- 430,6	71,1
Na ₂ S	к	- 374,47	79,5
O ₂	г	0	205,03
O ₃	г	142,3	238,8
S (ромб.)	к	0	31,88
SiO ₂	к	-859,3	42,09
Ti	к	0	30,63
TiO ₂	к	-943,9	50,33
V	к	0	28,9
V ₂ O ₅	к	-1552	131
Zr	к	0	38,99
ZrO ₂	к	-1100,6	50,4

* Приводимые в таблице величины взяты из справочника "Термические константы веществ" / Под ред.В.П. Глушко, ВИНТИ. М.,1965-1981. Вып. I-X.

Таблица П2 – Свойства некоторых металлов

Параметр	Fe	Co	Ni	Mo	Cr	Ca	Mn	Al	Mg	Cu
Атомный вес	55,85	59	58,7	95,94	52	40,08	54,94	27	24,3	63,55
Плотность, кг/м ³	7874	8900	8908	10280	7140	1550	7470	2699	1740	8900
Температура плавления, °С	1538	1495	1455	2623	1907	840	1246	660	650	1083
Температура кипения, °С	2861	2927	2913	4639	2671	1484	2061	2519	1107	2595
Теплота плавления, кДж/моль	13,8	16,2	17,2	36	20,5	9,2	13,2	10,75	9,2	13,01
Теплота испарения, кДж/моль	347	375	378	600	339	153,6	220	284,1	131,8	304,6

Таблица ПЗ – Свойства некоторых неметаллов

Параметр	Si	C (графит)	S	P	H	Ar	O
Атомный вес	28,09	12	32,07	31	1	40	16
Плотность, кг/м ³	2330	2250	2070	1820	0,09	1,784	1,43
Температура плавления, °С	1415	3500	112,85	44,3	-259	-189	-218,2
Температура кипения, °С	2350	4827	444,67	280	-253	-185,7	-182,8
Теплота плавления, кДж/моль	50,6	104,6	1,23	2,51	0,117	1,19	0,444
Теплота испарения, кДж/моль	383	355,8	10,5	49,8	0,904	6,52	3,41

Учебное издание

ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Лабораторные работы (практикум)
для студентов специальности
1-42 01 01 «Металлургическое производство
и материалобработка»

В 2 частях

Часть 1

С о с т а в и т е л и :

КОРНЕЕВ Сергей Владимирович
ТРУСОВА Ирина Александровна

Технический редактор *О. В. Песенько*

Подписано в печать 11.03.2015. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,36. Тираж 100. Заказ 650.

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.