



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
Кафедра «Материаловедение и технологии металлов»

# Практикум

по дисциплине  
«Металлургические расчёты»

Автор  
Бацемакин М.Ю.

Ростов-на-Дону, 2023

## Аннотация

Практикум предназначен для обучающихся заочной формы обучения направления 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», программа «Машины и оборудование металлургического производства».

## Автор

канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов»

Бацемакин М.Ю.

<b>Оглавление</b>	
<b><u>Практическая работа № 1 "Расчёт стандартной энергии Гиббса и константы равновесия химической реакции по справочным данным" .....</u></b>	<b>5</b>
1.1. Цель работы.....	5
1.2. Общие сведения.....	5
1.3. Порядок и пример выполнения работы.....	5
1.4. Варианты заданий.....	7
1.5. Перечень использованных информационных ресурсов.....	7
<b><u>Практическая работа № 2 "Расчёт распределения кислорода между металлом и шлаком с применением диаграмм активностей оксидов" .....</u></b>	<b>8</b>
2.1. Цель работы.....	8
2.2. Общие сведения.....	8
2.3. Порядок и пример выполнения работы.....	8
2.4. Варианты заданий.....	9
2.5. Перечень использованных информационных ресурсов.....	10
<b><u>Практическая работа № 3 "Расчёт распределения кремния между металлом и шлаком с применением диаграмм активности" .....</u></b>	<b>11</b>
3.1. Цель работы.....	11
3.2. Общие сведения.....	11
3.3. Порядок и пример выполнения работы.....	11
3.4. Варианты заданий.....	12
3.5. Перечень использованных информационных ресурсов.....	12
<b><u>Практическая работа № 4 "Расчёт распределения марганца между металлом и шлаком с использованием теории совершенных ионных растворов (ТСИР)" .....</u></b>	<b>14</b>
4.1. Цель работы.....	14
4.2. Общие сведения.....	14
4.3. Порядок и пример выполнения работы.....	14
4.4. Варианты заданий.....	15
4.5. Перечень использованных информационных ресурсов .....	16
<b><u>Практическая работа № 5 "Расчёт распределения элементов между металлом и шлаком с использованием теории регулярных ионных растворов (ТРИР)" .....</u></b>	<b>17</b>
5.1. Цель работы.....	17
5.2. Общие сведения.....	17
5.3. Порядок и пример выполнения работы.....	17
5.4. Варианты заданий.....	19
5.5. Перечень использованных информационных ресурсов .....	20
<b><u>Практическая работа № 6 "Полный технологический расчёт плавки (ДСП – скрап-процесс). Определение количества шлака и установление шлакового режима. Материальный баланс периодов плавки" .....</u></b>	<b>21</b>



6.1. Цель работы.....	21
6.2. Общие сведения.....	21
6.3. Порядок и пример выполнения работы.....	22
6.4. Варианты заданий.....	29
6.5. Перечень использованных информационных ресурсов.....	44
<b>Приложение 1.....</b>	<b>45</b>

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

# "РАСЧЁТ СТАНДАРТНОЙ ЭНЕРГИИ ГИББСА И КОНСТАНТЫ РАВНОВЕСИЯ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПО СПРАВОЧНЫМ ДАННЫМ"

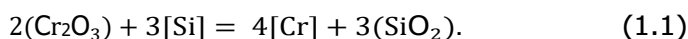
### 1.1. Цель работы

Цель работы. Научить обучающихся делать расчёт стандартной энергии Гиббса и константы равновесия химической реакции по справочным данным.

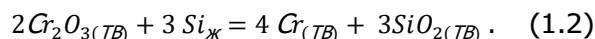
### 1.2. Общие сведения

Стандартной энергией Гиббса химической реакции  $\Delta G^0$  называют изменения энергии Гиббса системы в результате протекания реакции при условии, что исходные вещества и продукты реакции взяты в стандартах состояниях.

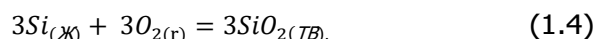
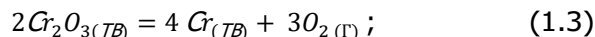
Для кремния, температура плавления которого меньше заданной, за стандартное состояние примем чистый жидкий кремний. Температура плавления остальных компонентов, участвующих в реакции (1.1),



превышает 1873 К, поэтому для них в качестве стандартного примем твёрдое состояние. При таком выборе стандартных состояний стандартная энергия Гиббса  $\Delta G^0$  равна изменению энергии Гиббса в результате реакции:



Реакцию (1.2) можно представить как сумму двух процессов:



Так что  $\Delta G^0 = 3G_{\text{SiO}_2(TB)}^0 - 2\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(TB)}^0$ ,

где  $\Delta G_{\text{SiO}_2(TB)}^0$  и  $\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(TB)}^0$  - стандартные энергии образования оксидов при 1873 К. Константа равновесия К определяется известным соотношением:  $\Delta G^0 = -RT \ln K$ . Для определения энергии образования химических соединений из элементов по уравнениям (1.3) и (1.4) используют справочные таблицы (таблицы стандартных величин), которые составлены по-разному: 1) значения  $\Delta G^0(T)$  приведены с определённым шагом по температуре (обычно 100 К); 2) приведены значения коэффициентов А и В, характеризующих температурную зависимость энергии Гиббса:  $\Delta G^0(T) = A + BT$ , указаны температурные интервалы, в которых коэффициенты А и В принимают постоянными величинами, независимыми от температуры; 3) даны приведённые энергии Гиббса веществ  $\phi^0(T)$ :

$$\phi^0(T) = -\frac{[G^0(T) - H_0^0]}{T}, \quad (1.5)$$

где  $H_0^0$  - энтальпия веществ 0 К.

Расчёт констант равновесия с использованием приведённых энергии Гиббса (случай 3) приводится по уравнению:  $R \ln K = \Delta \phi^0(T) - \frac{H_0^0}{T}$ ,

где  $\Delta \phi^0(T)$  - изменения приведённой энергии Гиббса в результате протекания реакции.

### 1.3. Порядок и пример выполнения работы

*Исходные данные.*

1. Значения стандартной энергии Гиббса образования соединений заданы в виде, Дж/моль: 1) табличных данных при 1873 К [1]:  $\Delta G_{\text{SiO}_2(TB)}^0 = -542070$ ;  $\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(TB)}^0 = -65107$ ;

2) уравнений [2]:  $\Delta G_{\text{SiO}_2(\text{ТВ})}^0 = -947000 + 198,0T$ ;  $\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 = -1131000 + 250,0T$ ;

3) приведённой энергии Гиббса при 1873 К [3]:  $\phi_{\text{Si}(\text{Ж})}^0 = 46,06$ ;  $\phi_{\text{Cr}(\text{ТВ})}^0 = 51,86$ ;  $\phi_{\text{O}_2(\text{ГАЗ})}^0 = 236,92$ ;  $\phi_{\text{SiO}_2(\text{ТВ})}^0 = 100,28$ ;  $\phi_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 = 192,82$ .

2. Теплота образования диоксида кремния и триоксида дихрома при 0 К [3], Дж/моль:  $\Delta H_{\text{SiO}_2}^0 = -905717$ ;  $\Delta H_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^0 = -1134777$ .

По исходным данным определяем стандартные энергии образования жидкого диоксида кремния и кристаллического триоксида дихрома:

1. Из таблиц [1] имеем:  $G_{\text{SiO}_2(\text{ТВ})}^0 = -542070$  Дж/моль;

$\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 = -651079$  Дж/моль.

2. В соответствии с приведёнными уравнениями:

$$G_{\text{SiO}_2(\text{ТВ})}^0 = -974000 + 198,0 \cdot T = -947000 + 198,0 \cdot 1873 = -576146 \text{ Дж/моль};$$

$$\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 = -1131000 + 250,0 \cdot T = -1131000 + 250,0 \cdot 1873 = -662750 \text{ Дж/моль}.$$

3. По данным о приведённых энергиях Гиббса [3] находим:

$$\Delta \phi_{\text{SiO}_2(\text{ТВ})}^0 = \phi_{\text{SiO}_2(\text{ТВ})}^0 - \phi_{\text{Si}(\text{Ж})}^0 - \phi_{\text{O}(\text{Г})}^0 = 100,28 - 46,06 - 236,92 = -182,7 \text{ Дж/(К·моль)}.$$

$$\begin{aligned} \phi_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 &= \phi_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 - 2\phi_{\text{Cr}(\text{ТВ})}^0 - \frac{3}{2} \cdot \phi_{\text{O}_2(\text{Г})}^0 = \\ &= 192,82 - 2 \cdot 51,86 - \frac{3}{2} \cdot 236,92 = -266,28 \text{ Дж/ (К моль)}. \end{aligned}$$

Используя уравнение (1.5) и исходные данные о теплоте образования оксидов при 0 К, получаем:

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{SiO}_2(\text{ТВ})}^0 &= \Delta H_{\text{SiO}_2}^0 - \Delta \phi_{\text{SiO}_2}^0 T = -905717 + 182,7 \cdot 1873 = \\ &= -563520 \text{ Дж/моль}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 &= \Delta H_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^0 - \Delta \phi_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 = -1134777 + 266,28 \cdot 1873 = \\ &= -636035 \text{ Дж/моль}. \end{aligned}$$

Стандартная энергия Гиббса реакции восстановления хрома кремнием [уравнение (1.2)] равна:

$$\Delta G^0 = -2\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0 + 3\Delta G_{\text{SiO}_2(\text{Ж})}^0$$

Подстановка найденных по разным данным значения  $\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{ТВ})}^0$   $\Delta G_{\text{SiO}_2(\text{Ж})}^0$  даёт следующие результаты:

1)  $\Delta G^0 = 2 \cdot 651079 - 3 \cdot 542070 = -324052 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ ;  $K=9,08 \cdot 10^{10}$ ;

2)  $\Delta G^0 = 2 \cdot 662750 - 3 \cdot 576146 = -402938 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ ;  $K=2,10 \cdot 10^{11}$ ;

3)  $\Delta G^0 = 2 \cdot 636035 - 3 \cdot 563520 = -418490 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ ;  $K=2,10 \cdot 10^{12}$ .

Примечание. 1. Рассчитанные разными способами значения  $\Delta G^0$  заметно различаются. Это связано с точностью определения величин  $\Delta G_{\text{SiO}_2}^0$  и  $\Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^0$ . По данным [1] при комнатной

температуре она составляет  $\sim 2$  кДж/моль для  $Cr_2O_3$  и  $\sim 4$  кДж/моль для  $SiO_2$ .

Более точными являются значения  $\Delta G^0$ , рассчитанные по данным [3] о приведённых потенциалах.

2. В некоторых справочных таблицах даны приведённые потенциалы веществ не при 0 К, а при 298 К. В этом случае  $\phi^0(T) = -[G^0(T) - H_{298}^0]!T$ ,

где  $H_{298}^0$  - энтальпия вещества при 298 К.

#### 1.4. Варианты заданий

Исходные данные для выполнения вариантов практической работы брать те, что и в примере выполнения работы.

#### 1.5. Перечень использованных информационных ресурсов

1. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. М.: Metallurgy, 1969. – 252 с.
2. Григорян В.А., Беянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Metallurgy, 1979. – 255 с. 1987. – 270 с.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. / Гуревич Л.В., Вейц Н.В., Медведев В.А. и др.: Справочное издание. / Отв. Ред. В.П. Глушко. Т. 1 – 4. М.: Наука – 1978 – 1982.
4. Физико-химические расчёты электросталеплавильных процессов: учеб. пособие для вузов / Григорян В.А., Стомахин А.Я., Пономаренко А.Г. и др. М.: Metallurgy, 1989. – 288 с.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

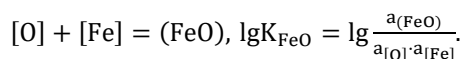
### "РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДА МЕЖДУ МЕТАЛЛОМ И ШЛАКОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГРАММ АКТИВНОСТЕЙ ОКСИДОВ"

#### 2.1. Цель работы

Цель работы. Научить обучающихся делать расчёт содержания кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

#### 2.2. Общие сведения

Распределения кислорода между шлаком и металлом описывают реакцией:



Согласно данным [1]

$$\lg K_{FeO} = \lg \left( \frac{a_{(FeO)}}{[\% O]} \right) = \left( \frac{6317}{T} \right) - 2,734. \quad (2.1)$$

#### 2.3. Порядок и пример выполнения работы

Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Исходные данные. Состав шлака, %: CaO 36,11; SiO<sub>2</sub> 33,04; FeO 6,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,26; MgO 14,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,37; MnO 6,33 (по данным Винклера и Чипмана).

Решение. На диаграммах активности концентрации оксидов обычно выражается в мольных долях (или мольных процентах). Содержание оксидов железа обычно выражают в виде:

$$(\% FeO_{общ}) = (\% FeO) + \frac{72 \cdot 2(\% Fe_2O_3)}{160} = 6,41 + \frac{72 \cdot 2 \cdot 1,26}{160} = 7,54\%.$$

Для данного шлака  $(\% FeO_{общ}) = 7,54$ . Выразим состав заданного шлака в мольных долях. Для этого находим число молей каждого компонента в 100 г. шлака:

$$m_{CaO} = \frac{36,11}{56} = 0,6448;$$

$$m_{SiO_2} = \frac{33,04}{60} = 0,5506;$$

$$m_{FeO_{общ}} = \frac{7,54}{72} = 0,1047;$$

$$m_{MgO} = \frac{14,97}{40} = 0,3742;$$

$$m_{P_2O_5} = \frac{1,37}{142} = 0,0096;$$

$$m_{MnO} = \frac{6,33}{71} = 0,0891;$$

Затем суммируем все  $m_i$ :

$$\begin{aligned} \Sigma m_i &= m_{CaO} + m_{SiO_2} + m_{FeO_{общ}} + m_{MgO} + m_{P_2O_5} + m_{MnO} = \\ &= 0,6448 + 0,5506 + 0,1047 + 0,3742 + 0,0096 + 0,0891 = \\ &= 1,773. \end{aligned}$$

После этого находим мольные доли всех компонентов  $M_i = \frac{m_i}{\Sigma m_i}$ .



$$M_{CaO} = \frac{0,6448}{1,773} = 0,3637;$$

$$M_{SiO_2} = \frac{0,5506}{1,773} = 0,3105;$$

$$M_{FeO_{общ}} = \frac{0,1047}{1,773} = 0,0591.$$

$$M_{MgO} = \frac{0,3742}{1,773} = 0,210;$$

$$M_{P_2O_5} = \frac{0,0096}{1,773} = 0,540.$$

$$M_{MnO} = \frac{0,0891}{1,773} = 0,0503.$$

Умножив  $M_i$  на 100, получим мольный состав шлака, %:

$$CaO \ 36,37; SiO_2 \ 31,05; FeO_{общ} \ 5,91; MgO \ 21,10; P_2O_5 \ 0,54; MnO \ 5,03.$$

Суммируя мольные концентрации основных и кислых оксидов согласно равномерности координат на диаграмме [1] (рис. 2.1):

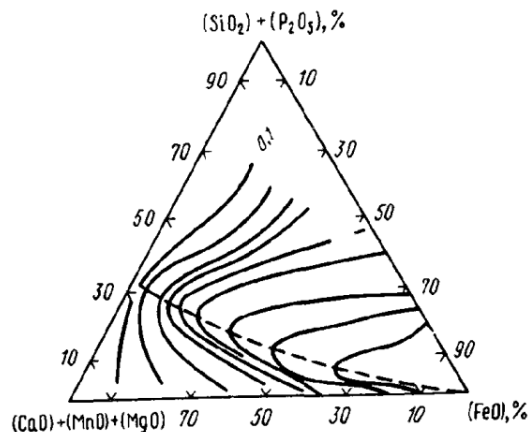


Рис. 2.1 Активность FeO в шлаке (цифры у кривых-значения  $a_{FeO}$ ).

$$M_{CaO} + M_{MnO} + M_{MgO} = 36,37 + 21,10 + 5,03 = 62,5 \ %;$$

$$M_{SiO_2} + M_{P_2O_5} = 31,05 + 0,54 = 31,59 \ %;$$

По диаграмме находим  $a_{FeO} = 0,3$ . Значения константы при 1873 К согласно выражению (1) равно  $K_O = 4,35$ . По условию задачи  $a_{[Fe]} = 1$ .

$$\text{Отсюда } [\% O] = \frac{a_{(FeO)}}{K_O} = \frac{0,3}{4,35} = 0,069 \ %.$$

## 2.4. Варианты заданий

**Вариант 1.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 34,11; SiO<sub>2</sub> 31,34; FeO 8,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,26; MgO 13,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,57; MnO 8,34.

**Вариант 2.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 32,11; SiO<sub>2</sub> 30,04; FeO 9,32; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,26; MgO 16,47; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,47; MnO 7,33.

**Вариант 3.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами

активностей.

Состав шлака, %: CaO 38,11; SiO<sub>2</sub> 34,44; FeO 5,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,56; MgO 12,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,40; MnO 6,11.

**Вариант 4.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 33,11; SiO<sub>2</sub> 33,24; FeO 4,11; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,87; MgO 17,47; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,07; MnO 9,13.

**Вариант 5.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 35,31; SiO<sub>2</sub> 32,34; FeO 6,91; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,76; MgO 15,77; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,77; MnO 6,14.

**Вариант 6.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 37,74; SiO<sub>2</sub> 31,28; FeO 7,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,56; MgO 11,67; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,01; MnO 8,33.

**Вариант 7.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 38,03; SiO<sub>2</sub> 29,97; FeO 5,83; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,75; MgO 17,54; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,62; MnO 5,26.

**Вариант 8.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 31,84; SiO<sub>2</sub> 30,02; FeO 8,95; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,83; MgO 15,40; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,99; MnO 8,97.

**Вариант 9.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 34,67; SiO<sub>2</sub> 31,35; FeO 7,71; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,12; MgO 16,61; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,21; MnO 7,33.

**Вариант 10.** Рассчитать содержание кислорода в металле, пользуясь тройными диаграммами активностей.

Состав шлака, %: CaO 38,57; SiO<sub>2</sub> 35,54; FeO 5,83; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,35; MgO 12,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,41; MnO 4,33.

## 2.5. Перечень использованных информационных ресурсов

1. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. М.: Metallurgy, 1969. – 252 с.

2. Физико-химические расчёты электросталеплавильных процессов: учеб. пособие для вузов / Григорян В.А., Стомахин А.Я., Пономаренко А.Г. и др. М.: Metallurgy, 1989. – 288 с.

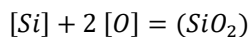
## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3 "РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРЕМНИЯ МЕЖДУ МЕТАЛЛОМ И ШЛАКОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГРАММ АКТИВНОСТИ"

### 3.1. Цель работы

Цель работы. Научить обучающихся делать расчёт содержания кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

### 3.2. Общие сведения

Содержание кремния в металле находим из равновесия реакции:



Пользуясь данными приложения 1, получим:

$$\lg K_{Si} = \lg \frac{a_{SiO_2}}{[\% Si] \cdot [\% O]^2} = \frac{30720}{T} - 11,76;$$

$$K_{Si(1873K)} = 43802.$$

Значение  $[\% O]$  определим по выражению для константы равновесия реакции  $[C] + [O] = CO$ , (см. Приложение 1):

$$\lg K_O = \frac{p_{CO}}{[\% C] \cdot [\% O]} = \frac{1168}{T} + 2,07;$$

$$K_{O(1873K)} = 494.$$

### 3.3. Порядок и пример выполнения работы

Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов. Исходные данные. Состав шлага, %: CaO 30,3; SiO<sub>2</sub> 28,2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 40,4. Содержание углерода в металле 2,62 %.

Решение. Выразим мольный состав шлага в процентах:

$$m_{CaO} = \frac{30,3}{56} = 0,5410;$$

$$m_{SiO_2} = \frac{28,2}{60} = 0,47;$$

$$m_{Al_2O_3} = \frac{40,4}{86} = 0,4697;$$

Затем суммируем все  $m_i$ :

$$\Sigma m_i = m_{CaO} + m_{SiO_2} + m_{Al_2O_3} = 0,5410 + 0,47 + 0,4697 = 1,4807.$$

После этого находим мольные доли всех компонентов  $M_i = \frac{m_i}{\Sigma m_i}$ .

$$M_{CaO} = \frac{0,5410}{1,4807} = 0,3654;$$

$$M_{SiO_2} = \frac{0,47}{1,4807} = 0,3174;$$

$$M_{Al_2O_3} = \frac{0,4697}{1,4807} = 0,3172.$$

Умножив  $M_i$  на 100, получим мольный состав шлага, %: CaO 36,54; SiO<sub>2</sub> 31,74; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 31,72. По диаграмме рис. 3.1, находим  $a_{SiO_2} = 0,04$ . Определяем содержание кислорода в металле,

принимая  $p_{CO} = 1$  атм:

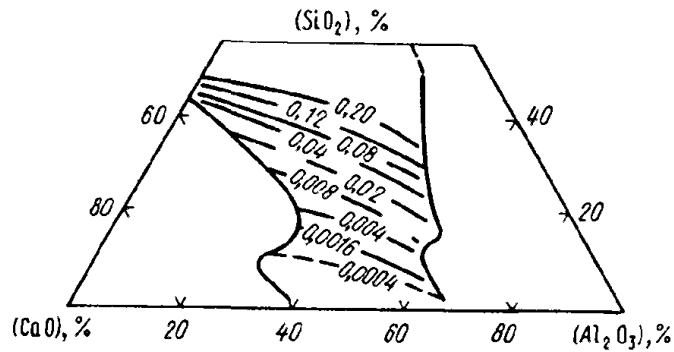


Рис. 3.1. Активность SiO<sub>2</sub> в шлаке (цифры у кривых – значения  $a_{SiO_2}$ ).

$$[\% O] = \frac{1}{([C] \cdot K_O)} = \frac{1}{(2,62 \cdot 494)} = 0,0007 \%$$

Содержание кремния в металле:

$$[Si] = \frac{a_{(SiO_2)}}{(K_{Si} \cdot [O_2]^2)} = \frac{0,04}{(43802 \cdot 0,0007^2)} = 1,86\%$$

### 3.4. Варианты заданий

**Вариант 1.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 29,3; SiO<sub>2</sub> 29,2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 39,4. Содержание углерода в металле 2,1 %.

**Вариант 2.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 31,3; SiO<sub>2</sub> 27,2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 38,4. Содержание углерода в металле 3,1 %.

**Вариант 3.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 32,3; SiO<sub>2</sub> 27,7; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 37,4. Содержание углерода в металле 2,6 %.

**Вариант 4.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 28,3; SiO<sub>2</sub> 26,2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 42,8. Содержание углерода в металле 2,7 %.

**Вариант 5.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 33,2; SiO<sub>2</sub> 28,1; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 36,5. Содержание углерода в металле 2,2 %.

**Вариант 6.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 33,78; SiO<sub>2</sub> 30,2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 34,4. Содержание углерода в металле 1,62 %.

**Вариант 7.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 31,8; SiO<sub>2</sub> 27,8; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 38,6. Содержание углерода в металле 1,8 %.

**Вариант 8.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 30,9; SiO<sub>2</sub> 29,7; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 37,7. Содержание углерода в металле 1,7 %.

**Вариант 9.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 29,3; SiO<sub>2</sub> 29,2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 39,9. Содержание углерода в металле 1,6 %.

**Вариант 10.** Рассчитать содержание кремния в металле, пользуясь диаграммами активности компонентов.

Состав шлака, %: CaO 35,3; SiO<sub>2</sub> 26,2; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 35,7. Содержание углерода в металле 2,8 %.

### 3.5. Перечень использованных информационных ресурсов



1. Физико-химические расчёты электросталеплавильных процессов: учеб. пособие для вузов / Григорян В.А., Стомахин А.Я., Пономаренко А.Г. и др. М.: Metallurgy, 1989. – 288 с.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

### "РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАРГАНЦА МЕЖДУ МЕТАЛЛОМ И ШЛАКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ СОВЕРШЕННЫХ ИОННЫХ РАСТВОРОВ (ТСИР)"

#### 4.1. Цель работы

Цель работы. Научить обучающихся делать расчёт распределения марганца между металлом и шлаком с использованием теории совершенных ионных растворов (ТСИР).

#### 4.2. Общие сведения

ТСИР основана на предположении, что энтальпия смешения раствора равна нулю, а парциальная энтропия смешения в выражении для химического потенциала:

$$\mu_{(MeO)} = \mu_{(MeO)}^0 + H_{(MeO)}^{-M} - TS_{(MeO)}^{-M}$$

равна  $S_{(MeO)} = -R \ln x_{Me}^+ x_O^-$ ,

где  $x_{Me}^+$  и  $x_O^-$  - соответственно катионная доля металла и анионная доля кислорода в шлаке. Катионная и анионная доли представляют собой соотношение числа ионов данного компонента и ионов того же знака. Эти величины получили название ионных долей по Тёмкину. Сопоставляя получаемое при этом выражение для химического потенциала  $\mu_{(MeO)} = \mu_{(MeO)}^0 + RT \ln x_{Me}^+ \cdot x_O^-$  с термодинамическим определением активности находим:

$$\mu_{(MeO)} = \mu_{(MeO)}^0 + RT \ln a_{(MeO)}$$

Находим:

$$a_{(MeO)} = x_{Me}^+ \cdot x_O^- \quad (4.1)$$

Таким образом, расчёт активностей компонентов шлака по ТСИР сводится к определению ионных долей по Темкину.

При этом представляет трудность выбор вида ионов, на которые диссоциируют соединения шлака. В простейшем случае принимают, что происходит полная диссоциация на одноатомные ионы.

#### 4.3. Порядок и пример выполнения работы

Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлака.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлака, %: CaO 36,11; SiO<sub>2</sub> 33,04; FeO 6,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,26; MgO 14,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,37; MnO 6,33 (по данным Винклера и Чипмана).

*Решение.* Содержание оксидов железа обычно выражают в виде:

$$(\% FeO_{общ}) = (\% FeO) + \frac{72 \cdot 2(\% Fe_2O_3)}{160} = 6,41 + \frac{72 \cdot 2 \cdot 1,26}{160} = 7,54\%$$

Для данного шлака  $(\% FeO_{общ}) = 7,54$ . При условии полной диссоциации находим число молей каждого компонента (оксида) в 100 г шлака:

$$M_{CaO} = \left(\frac{36,11}{56}\right) = 0,6448;$$

$$M_{SiO_2} = \frac{33,04}{60} = 0,5506;$$

$$M_{FeO} = \left(\frac{7,54}{72}\right) = 0,1047;$$

$$M_{\text{MgO}} = \frac{14,97}{40} = 0,3742;$$

$$M_{\text{P}_2\text{O}_5} = \frac{1,37}{142} = 0,0096;$$

$$M_{\text{MnO}} = \left(\frac{6,33}{71}\right) = 0,0891.$$

Находим суммарное число молей в 100 г шлага:

$$\begin{aligned} \sum n_i &= M_{\text{CaO}} + M_{\text{SiO}_2} + M_{\text{FeO}} + M_{\text{MgO}} + M_{\text{P}_2\text{O}_5} + M_{\text{MnO}} = \\ &= 0,6448 + 0,5506 + 0,1047 + 0,3742 + 2 \cdot 0,0096 + 0,0891 = 1,7826. \end{aligned}$$

Находим ионные доли компонентов  $x_i = \frac{n_i^-}{\sum n_i^-}$ :

$$x_{\text{Ca}} = \frac{0,6448}{1,7826} = 0,3617;$$

$$x_{\text{Si}} = \frac{0,5506}{1,7826} = 0,3088;$$

$$x_{\text{P}} = 2 \cdot \frac{0,0096}{1,7826} = 0,0107.$$

Остальные значения:

$$x_{\text{Fe}} = \frac{0,1047}{1,7826} = 0,0587;$$

$$x_{\text{Mg}} = \frac{0,3742}{1,7826} = 0,2099;$$

$$x_{\text{Mn}} = \frac{0,0891}{1,7826} = 0,0499.$$

Единственным анионом в заданном шлаке является кислород  $\text{O}^{2-}$  поэтому  $x_{\text{O}^-} = \frac{n_{\text{O}^-}}{\sum n_i^-} = 1$ . Тогда активности оксидов в шлаке в соответствии с уравнением (4.1) равны их катионным долям. Константа реакции [1]  $[\text{Mn}] + (\text{FeO}) = (\text{MnO}) + [\text{Fe}]$  определяется по формулам:

$$\lg K_{\text{Mn}} = \lg \frac{a_{(\text{MnO})}}{a_{(\text{FeO})} \cdot [\text{Mn}]} = \frac{8883}{T} - 4,046;$$

$$K_{\text{Mn}(1873\text{K})} = 4,97.$$

Содержание марганца в металле составляет:

$$[\text{Mn}] = \frac{a_{(\text{MnO})}}{a_{(\text{FeO})} \cdot K_{\text{Mn}}} = \frac{0,0499}{0,0587 \cdot 4,97} = 0,17\%.$$

*Примечание.* Наилучшие результаты ТСИР даёт при описании распределения серы между металлом и основным (> 30% CaO) шлагом. В других случаях ТСИР может применяться лишь для грубых оценок активностей.

#### 4.4. Варианты заданий

**Вариант 1.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлагом при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[\text{Fe}]} = 1$ ,  $a_{[\text{O}]} = [\% \text{O}]$ ,  $a_{\text{Mn}} = [\% \text{Mn}]$ .

Состав шлага, %: CaO 34,11; SiO<sub>2</sub> 31,34; FeO 8,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,26; MgO 13,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,57; MnO 8,34.

**Вариант 2.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлагом при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 32,11; SiO<sub>2</sub> 30,04; FeO 9,32; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,26; MgO 16,47; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,47; MnO 7,33.

**Вариант 3.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 38,11; SiO<sub>2</sub> 34,44; FeO 5,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,56; MgO 12,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,40; MnO 6,11.

**Вариант 4.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 33,11; SiO<sub>2</sub> 33,24; FeO 4,11; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,87; MgO 17,47; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,07; MnO 9,13.

**Вариант 5.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 35,31; SiO<sub>2</sub> 32,34; FeO 6,91; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,76; MgO 15,77; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,77; MnO 6,14.

**Вариант 6.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 37,74; SiO<sub>2</sub> 31,28; FeO 7,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,56; MgO 11,67; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,01; MnO 8,33.

**Вариант 7.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 38,03; SiO<sub>2</sub> 29,97; FeO 5,83; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,75; MgO 17,54; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,62; MnO 5,26.

**Вариант 8.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 31,84; SiO<sub>2</sub> 30,02; FeO 8,95; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,83; MgO 15,40; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,99; MnO 8,97.

**Вариант 9.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 34,67; SiO<sub>2</sub> 31,35; FeO 7,71; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,12; MgO 16,61; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,21; MnO 7,33.

**Вариант 10.** Рассчитать равновесное распределение марганца между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТСИР для оценки активности компонентов шлага.

*Исходные данные.* Металл - практически чистое железо.

Принимаем  $a_{[Fe]} = 1$ ,  $a_{[O]} = [\%O]$ ,  $a_{Mn} = [\%Mn]$ .

Состав шлага, %: CaO 38,57; SiO<sub>2</sub> 35,54; FeO 5,83; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,35; MgO 12,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,41; MnO 4,33.

#### 4.5. Перечень использованных информационных ресурсов

1. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. М.: Metallurgy. 1967. – 792 с.
2. Физико-химические расчёты электросталеплавильных процессов: учеб. пособие для вузов / Григорян В.А., Стомахин А.Я., Пономаренко А.Г. и др. М.: Metallurgy, 1989. – 288 с.



## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

### "РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ МЕТАЛЛОМ И ШЛАКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ РЕГУЛЯРНЫХ ИОННЫХ РАСТВОРОВ (ТРИР)"

#### 5.1. Цель работы

Цель работы. Научить обучающихся делать расчёт распределения элементов между металлом и шлаком с использованием теории регулярных ионных растворов (ТРИР).

#### 5.2. Общие сведения

В регулярном ионном растворе энтропия находится как в совершенном ионном растворе (ТСИР), а энтальпия - как в регулярном. Например, выражение для химического потенциала компонента бинарного раствора FeO - MnO имеет вид:

$$\mu_{(FeO)} = \mu_{(FeO)}^0 + RT \ln x_{Fe} + x_{Mn}^2 \cdot Q_{Mn-Fe}. \quad (5.1)$$

Сравнивая выражение (1) с определением химического потенциала в виде

$$\mu_{(FeO)} = \mu_{(FeO)}^0 + RT \ln a_{(FeO)},$$

$$a_{(FeO)} = x_{Fe} \cdot \gamma_{(Fe)},$$

можно получить  $RT \ln \gamma_{(FeO)} = x_{Mn}^2 \cdot Q_{Mn-Fe}$

где  $Q_{Mn-Fe}$  - определяемый из опыта постоянный множитель;  $x_{Fe}$ ,  $x_{Mn}$  - ионные доли по Тёмкину (ТСИР).

В.А. Кожеуровым выражение (5.1) было обобщено для шлаков сложного состава. Полученные при этом выражения для коэффициентов активности  $\gamma_{(Fe)}$  и  $\gamma_{(Mn)}$  имеют вид [1]:

$$\lg \gamma_{(Fe)} = \frac{1000}{T} \cdot [2,18 \cdot x_{Mn} \cdot x_{Si} + 5,90 \cdot (x_{Ca} + x_{Mg}) \cdot x_{Si} + 10,50 \cdot x_{Ca} \cdot x_p];$$

$$\lg \gamma_{(Mn)} = \lg \gamma_{(Fe)} - \left(\frac{2180}{T}\right) \cdot x_{Si};$$

$$\lg \gamma_{(P)} = \lg \gamma_{(Fe)} - \left(\frac{10500}{T}\right) \cdot x_{Ca}.$$

#### 5.3. Порядок и пример выполнения работы

Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

*Исходные данные.* Состав шлака, %: CaO 36,11; SiO<sub>2</sub> 33,04; FeO 6,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,26; MgO 14,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,37; MnO 6,33 (по данным Винклера и Чипмана).

*Решение.* Содержание оксидов железа обычно выражают в виде:

$$(\% FeO_{общ}) = (\% FeO) + \frac{72 \cdot 2(\% Fe_2O_3)}{160} = 6,41 + \frac{72 \cdot 2 \cdot 1,26}{160} = 7,54\%.$$

Для данного шлака  $(\% FeO_{общ}) = 7,54$ . При условии полной диссоциации находим число молей каждого компонента (оксида) в 100 г шлака:

$$M_{CaO} = \left(\frac{36,11}{56}\right) = 0,6448;$$

$$M_{SiO_2} = \frac{33,04}{60} = 0,5506;$$

$$M_{FeO} = \left(\frac{7,54}{72}\right) = 0,1047;$$

$$M_{\text{MgO}} = \frac{14,97}{40} = 0,3742;$$

$$M_{\text{P}_2\text{O}_5} = \frac{1,37}{142} = 0,0096;$$

$$M_{\text{MnO}} = \left(\frac{6,33}{71}\right) = 0,0891.$$

Находим суммарное число молей в 100 г шлака:

$$\begin{aligned} \sum n_i &= M_{\text{CaO}} + M_{\text{SiO}_2} + M_{\text{FeO}} + M_{\text{MgO}} + M_{\text{P}_2\text{O}_5} + M_{\text{MnO}} = \\ &= 0,6448 + 0,5506 + 0,1047 + 0,3742 + 2 \cdot 0,0096 + 0,0891 = 1,7826. \end{aligned}$$

Выражаем состав шлака в ионных долях по Тёмкину. Находим ионные доли компонентов  $x_i = \frac{n_i^-}{\sum n_i^-}$ :

$$x_{\text{Ca}} = \frac{0,6448}{1,7826} = 0,3617;$$

$$x_{\text{Si}} = \frac{0,5506}{1,7826} = 0,3088;$$

$$x_{\text{P}} = 2 \cdot \frac{0,0096}{1,7826} = 0,0107.$$

Остальные значения:

$$x_{\text{Fe}} = \frac{0,1047}{1,7826} = 0,0587;$$

$$x_{\text{Mg}} = \frac{0,3742}{1,7826} = 0,2099;$$

$$x_{\text{Mn}} = \frac{0,0891}{1,7826} = 0,0499.$$

Вычисляем коэффициенты активности:

$$\begin{aligned} \lg \gamma_{(\text{Fe})} &= \frac{1000}{1873} \cdot [2,18 \cdot 0,0499 \cdot 0,3088 + 5,9 \cdot (0,3617 + 0,2099) \cdot \\ &\quad \cdot 0,3088 + 10,50 \cdot 0,3617 \cdot 0,0107] = 0,5956; \end{aligned}$$

$$\gamma_{(\text{Fe})} = 3,94;$$

$$\lg \gamma_{(\text{Mn})} = 0,5956 - \frac{2180}{1873} \cdot 0,3088 = 0,2362;$$

$$\gamma_{(\text{Mn})} = 1,72;$$

$$\lg \gamma_{(\text{P})} = 0,5956 - \frac{10500}{1873} \cdot 0,3617 = -1,432;$$

$$\gamma_{(\text{P})} = 0,037.$$

Находим активности компонентов шлака:

$$a_{(\text{MnO})} = x_{\text{Mn}} \cdot \gamma_{(\text{Mn})} = 0,0499 \cdot 1,72 = 0,0858;$$

$$a_{(\text{FeO})} = x_{\text{Fe}} \cdot \gamma_{(\text{Fe})} = 0,0587 \cdot 3,94 = 0,2312;$$

$$a_{(\text{P}_2\text{O}_5)} = x_{\text{P}}^2 \cdot \gamma_{(\text{P})}^2 = (0,0107 \cdot 0,037)^2 = 0,156 \cdot 10^{-6}.$$

Содержание марганца найдём по равновесию реакции  $[\text{Mn}] + (\text{FeO}) = (\text{MnO}) + [\text{Fe}]$ :

$$\lg K_{Mn} = \lg \frac{a_{(MnO)}}{[Mn] \cdot a_{(FeO)}} = \frac{6700}{T} - 3,12.$$

При 1873 К  $K_{Mn} = 2,865$ ,

$$[Mn] = \frac{a_{(MnO)}}{K_{Mn} a_{(FeO)}} = \frac{0,0858}{0,2312 \cdot 2,865} = 0,129\%.$$

Содержание фосфора определяем по равновесию реакции [1]  $2[P] + 5(FeO) = (P_2O_5) + 5 [Fe]$ :

$$\lg K_P = \frac{a_{(P_2O_5)}}{[P]^2 \cdot a_{(FeO)}^5} = -1,640,$$

$$K_P = 2,29 \cdot 10^{-2};$$

$$[P] = \left( \frac{a_{(P_2O_5)}}{K_P \cdot a_{(FeO)}^5} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{0,156 \cdot 10^{-6}}{2,29 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2312^5} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,101\%.$$

Содержание кислорода определяем по равновесию реакции [2]  $[Fe] + [O] = (FeO)$ :

$$\lg K_O = \frac{a_{(FeO)}}{[O]} = \left( \frac{6317}{T} \right) - 2,734;$$

$$K_{O(1873K)} = 4,351;$$

$$[O] = \frac{a_{(FeO)}}{K_O} = \frac{0,2312}{4,351} = 0,053\%.$$

*Примечание.* ТРИР относится к числу наиболее совершенных методов оценки активностей компонентов шлаковых систем. Основная трудность применения теории заключается в отсутствии надежных данных об энергиях смешения для ряда практически важных шлаков в частности шлаков, содержащих  $Al_2O_3$  и  $CaF_2$ .

#### 5.4. Варианты заданий

**Вариант 1.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 34,11; SiO<sub>2</sub> 31,34; FeO 8,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,26; MgO 13,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,57; MnO 8,34.

**Вариант 2.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 32,11; SiO<sub>2</sub> 30,04; FeO 9,32; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,26; MgO 16,47; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,47; MnO 7,33.

**Вариант 3.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 38,11; SiO<sub>2</sub> 34,44; FeO 5,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,56; MgO 12,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,40; MnO 6,11.

**Вариант 4.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 33,11; SiO<sub>2</sub> 33,24; FeO 4,11; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,87; MgO 17,47; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,07; MnO 9,13.

**Вариант 5.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 35,31; SiO<sub>2</sub> 32,34; FeO 6,91; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,76; MgO 15,77; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,77; MnO 6,14.

**Вариант 6.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 37,74; SiO<sub>2</sub> 31,28; FeO 7,41; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,56; MgO 11,67; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,01; MnO 8,33.

**Вариант 7.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 38,03; SiO<sub>2</sub> 29,97; FeO 5,83; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,75; MgO 17,54; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,62; MnO 5,26.

**Вариант 8.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 31,84; SiO<sub>2</sub> 30,02; FeO 8,95; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,83; MgO 15,40; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,99; MnO 8,97.

**Вариант 9.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 34,67; SiO<sub>2</sub> 31,35; FeO 7,71; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,12; MgO 16,61; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,21; MnO 7,33.

**Вариант 10.** Рассчитать равновесное распределение марганца, кислорода и фосфора между металлом и шлаком при 1873 К, используя ТРИР.

Состав шлака, %: CaO 38,57; SiO<sub>2</sub> 35,54; FeO 5,83; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,35; MgO 12,97; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,41; MnO 4,33.

### 5.5. Перечень использованных информационных ресурсов

1. Кожеуров В.А. Термодинамика металлургических шлаков. Свердловск: Metallurgizdat. 1955. – 162 с.
2. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. М.: Metallurgiya. 1967. – 792 с.
3. Физико-химические расчёты электросталеплавильных процессов: Учеб. Пособие для вузов / Григорян В.А., Стомахин А.Я., Пономаренко А.Г. и др. М.: Metallurgiya, 1989. – 288 с.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

### "ПОЛНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПЛАВКИ (ДСП – СКРАП-ПРОЦЕСС). ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ШЛАКА И УСТАНОВЛЕНИЕ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПЕРИОДОВ ПЛАВКИ"

#### 6.1. Цель работы

Цель работы. Научить обучающихся делать полный технологический расчёт плавки (ДСП – скрап-процесс). Определение количества шлака и установление шлакового режима. Материальный баланс периодов плавки.

#### 6.2. Общие сведения

В окислительный период  $\tau_{ок.}$  из металла удаляют фосфор, газы, происходит подогрев, выравниваются температура и состав металла по всему объёму. Для удаления газов в жидкой ванне окисляют углерод, который образует пузырьки монооксида углерода. Растворимые в металле водород и азот диффундируют в пузырьки монооксида углерода и вместе с ними выносятся наружу. Этот процесс способствует кипению (барботажу) ванны, ускоряя её подогрев и выравнивание в ней температуры. В ДСП с основной футеровкой находящийся в металле фосфор окисляется до фосфорного ангидрида, который всплывает в шлак. Для связывания фосфорного ангидрида с оксидом кальция в прочное соединение необходимо иметь высокоосновный жидкоподвижный шлак, который наводят, задавая в печь известь. Удаление из металла фосфора идёт лучше, если металл не перегрет и в нём имеется достаточное количество кислорода. Кислород вводится в жидкую ванну либо в газообразном виде, либо с железной рудой. Для лучшего удаления фосфора из металла значительная часть шлака при проведении окислительного периода удаляется из печи самотёком или скачиванием. Для обеспечения нормального процесса дегазации и дефосфорации металла достаточно из него удалить 0,3 – 0,5% С. Продолжительность окислительного периода может быть сокращена за счёт частичного удаления фосфора в конце периода расплавления. Заканчивается окислительный период скачиванием из печи шлака начисто. Кратность шлака окислительного периода  $K_{шл. ок.}$  составляет 2 – 4% массы металла.

Восстановительный период  $\tau_{восст.}$  начинается с момента наведения нового шлака на зеркале металла. В ДСП с основной футеровкой наводят основной шлак из свежееобожжённой извести с использованием в качестве разжижителя плавикового шпата и шамотного боя. В этот период из металла удаляют кислород, серу, корректируют химический состав жидкого металла и подогревают его. Раскисляют металл диффузионным способом через шлак (для этого на шлак подаётся порошок кокса и ферросилиция) и глубинным методом (в металл вводят ферросилиций в кусках). Окончательное раскисление проводят введением в жидкую ванну алюминия на штанге. Для легирования стали в металл вводят такие добавки, как феррохром, ферромарганец, ферросилиций, ферровольфрам, ферротитан. Продолжительность восстановительного периода в печи зависит от сортамента выплавляемых сталей и вместимости печи. Кратность шлака восстановительного периода ( $K_{шл. восст.}$ ) составляет 3 – 6% массы металла. При классической технологии выплавки стали в дуговой печи приходится работать с двумя – тремя шлаками разного химического состава. При этом нужно понимать, что суть диффузионного раскисления, протекающего в течение всего периода, заключается в следующем. Так как раскисляющие вещества применяют в порошкообразном виде, плотность их невелика, и они очень медленно опускаются через слой шлака. В шлаке протекают следующие реакции раскисления:  $(FeO) + C = Fe + CO$ ;  $2(FeO) + Si = 2Fe + (SiO_2)$  и т.д., в результате содержание FeO в шлаке уменьшается и в соответствии с законом распределения  $\frac{[FeO]}{[FeO]} = const$  кислород (в виде FeO) начинает путём диффузии переходить из металла в шлак (диффузионное раскисление). Преимущество диффузионного раскисления заключается в том, что поскольку реакции раскисления идут в шлаке, выплавляемая сталь не загрязняется продуктами раскисления – образующимися окислами. Это способствует получению стали с пониженным содержанием неметаллических включений.

По мере диффузионного раскисления постепенно уменьшается содержание FeO в шлаке, и пробы застывшего шлака светлеют, а затем становятся почти белыми. Белый шлак конца восстановительного периода электроплавки имеет следующий состав, %: 53–60 CaO; 15–25 SiO<sub>2</sub>; 7–15 MgO; 5–8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 5–10 CaF<sub>2</sub>; 0,8–1,5 CaS; < 0,5 FeO; < 0,5 MnO.

В высокоомощных дуговых печах получила развитие тенденция сокращения окислительного и

восстановительного периодов плавки в печи с вынесением выполнения задач этих периодов в ковш. При этом в печи проводится в основном удаление фосфора, процесс плавки идёт с одним шлаком, длительность плавки составляет 1,5-2,0 ч.

В табл. 6.1 представлены показатели ДСП высокой мощности, по нормам Гипромеца, применительно к печам с кирпичной футеровкой стен и свода. По мере повышения удельной мощности печей, использования водоохлаждаемых элементов кладки стен и свода, обработки жидкого металла в ковше, производительность высокоомощных ДСП значительно возросла. Это нашло отражение в нормах для высокоомощных ДСП вместимостью 50, 100 и 150 т.

Таблица 6.1

Показатели ДСП высокой мощности

Вместимость печи, т	50	100	150
Мощность трансформатора, кВ·А	50000	80000	100000
Общая продолжительность плавки, ч-мин	1-25	1-30	1-40
В том числе продолжительность периодов плавки, ч-мин:			
Заправка	0-03	0-03	0-03
Загрузка 1-й корзины	0-03	0-03	0-03
Замена и перепуск электродов	0-04	0-04	0-04
Плавление 1-й корзины	0-20	0-20	0-20
Загрузка 2-й корзины	0-05	0-05	0-06
Доплавление	0-25	0-30	0-35
Контроль и доводка металла	0-20	0-20	0-20
Выпуск	0-05	0-05	0-06
Годовая производительность при выплавке стали, тыс.т.	270	500	650

*Примечания:* 1. Заправку и торкретирование длительностью 30-40 мин производят через 8-12 плавов, что составляет в среднем 3-4 мин на плавку. 2. Перепуск электродов производят при отвернутом своде во время загрузки шихты в печь.

### 6.3. Порядок и пример выполнения работы

#### 1. Расчёт материального баланса

Материальный баланс плавки в дуговой печи записывается в следующем виде:

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 = M_6 + M_7 + M_8 + M_9 + M_{10}, \quad (6.1)$$

где  $M_1$  – расход передельного чугуна;

$M_2$  – расход металлического лома;

$M_3$  – расход извести свежесожжённой;

$M_4$  – количество футеровки, перешедшей в шлак;

$M_5$  – расход технического кислорода;

$M_6$  – количество получаемой жидкой стали;

$M_7$  – количество образующегося шлака;

$M_8$  – количество выделяющихся газов;

$M_9$  – потери металла с пылью;

$M_{10}$  – потери металла с выносами и выбросами.

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. Расход передельного чугуна составляет 17%, или 170 кг/т металлошихты. Расход металлического лома составляет 83%, или 830 кг/т металлошихты.

Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты.

В табл. 6.2 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.2

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей, %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Ni	Cu	Другие элементы
							Не более				
Состав стали 22ХГ2А по ГОСТ 53366–2009	0,20–0,24	0,20–0,35	1,35–1,55	0,80–1,05	0,070–0,10	Не менее 0,015	0,010	0,015	0,2	0,30	Sn≤0,022
Чугун передельный П2 по ГОСТ 805–95	4,55	0,7	0,8	–	–	–	0,04	0,04	–	–	–
Металлолом категории 3А по ГОСТ 2787–75	0,2	0,26	0,65	0,02	–	–	0,035	0,035	0,02	0,02	–
Средний состав шихты	0,9395	0,3348	0,6755	–	–	–	0,03585	0,03585	–	–	–
Состав стали перед выпуском	0,070	0,0058	0,210	0,140	–	–	0,045	0,013	0,110	0,210	Sn≤0,01; As≤0,007
Окислилось примесей	0,8695	0,329	0,4655	0,0166	–	–	0,00915	0,02285	0,0166	0,0166	–

Таблица 6.3

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Известь свежееобожжённая	92	2,5	1,0	3,3	0,1	0,2	0,2	0,6	0,1
Футеровка ДСП	2,0	1,6	0,3	95	–	–	–	–	–
Загрязнения лома	–	65	35	–	–	–	–	–	–

## 2. Расчёт среднего состава шихты.

Средний состав рассчитывается по уравнению

$$C_i^{cp} = C_i^{чуг} \cdot (1 - d) + C_i^{лом} \cdot d, \quad (6.2)$$

где  $C_i^{cp}$ ,  $C_i^{чуг}$ ,  $C_i^{лом}$  – средняя массовая доля  $i$ -го компонента, а также его массовая доля в чугуна и в ломе, %;  $d$  – доля лома в металлической части шихты.

$$C_c^{cp} = 4,55 \cdot (1 - 0,83) + 0,2 \cdot 0,83 = 0,9395;$$

$$C_{Si}^{cp} = 0,7 \cdot (1 - 0,83) + 0,26 \cdot 0,83 = 0,3348;$$

$$C_{Mn}^{cp} = 0,8 \cdot (1 - 0,83) + 0,65 \cdot 0,83 = 0,6755;$$

$$C_{Cr}^{cp} = 0,02 \cdot 0,83 = 0,0166;$$

$$C_S^{cp} = 0,04 \cdot (1 - 0,83) + 0,035 \cdot 0,83 = 0,03585;$$

$$C_p^{cp} = 0,04 \cdot (1 - 0,83) + 0,035 \cdot 0,83 = 0,03585.$$

## 3. Определение расхода извести свежееобожжённой.

Известь свежееобожжённая вводится в шихту плавки в дуговую печь с целью получения шлака необходимой основности:

$$B = \frac{(CaO)}{(SiO_2)}. \quad (6.3)$$

Источниками оксида кальция являются: известь свежееобожжённая ( $I_3$ ) и материал футеровки печи ( $I_4$ ).

Источниками оксида кремния являются:

- окисляющийся кремний чугуна и лома ( $K_{1,2}$ );
- кремнезём загрязнений металлического лома ( $K_2$ );
- кремнезём, содержащийся в извести свежееобожжённой ( $K_3$ );
- кремнезём материала футеровки печи ( $K_4$ ).

Поступит кремнезёма из шихты за счёт окисления кремния:

$$K_{1,2} = \frac{M_1[Si]_1}{100} \cdot \frac{60}{28} + \frac{M_2[Si]_2}{100} \cdot \frac{60}{28} = \frac{2,14}{100} \cdot (M_1 \cdot [Si]_1 + M_2 \cdot [Si]_2); \quad (6.4)$$

$$K_{1,2} = \frac{2,14}{100} \cdot (170 \cdot 0,7 + 830 \cdot 0,26) = 7,16 \text{ кг.}$$

Кремнезём загрязнений металлического лома:

$$K_2 = \frac{m \cdot (M_1 + M_2)}{10^4} \cdot (SiO_2)_2, \quad (6.5)$$

где  $m$  – количество мусора в ломе, 1%;  $(SiO_2)_2$  – количество кремнезёма в мусоре, 65%.



$$K_2 = \frac{1 \cdot 1000}{10000} \cdot 65 = 6,5 \text{ кг.}$$

Кремнезём, содержащийся в извести свежееобожжённой:

$$K_3 = \frac{M_3}{100} \cdot (\text{SiO}_2)_3, \quad (6.6)$$

где  $(\text{SiO}_2)_3$  – массовая доля оксида кремния в извести свежееобожжённая, 2,5 %.  $K_3 = 0,025 \cdot M_3$ .  
Кремнезём материала футеровки:

$$K_4 = \frac{M_4}{100} \cdot (\text{SiO}_2)_4, \quad (6.7)$$

где  $(\text{SiO}_2)_4$  – массовая доля оксида кремния в материале футеровки, 1,6%.

$$K_4 = \frac{3}{100} \cdot 1,6 = 0,048 \text{ кг.}$$

Поступит оксида кальция из извести свежееобожжённой:

$$И_3 = \frac{M_3}{100} \cdot (\text{CaO})_3, \quad (6.8)$$

где  $(\text{CaO})_3$  – массовая доля оксида кальция в извести свежееобожжённой, 92%.

$$И_3 = 0,92 \cdot M_3$$

Поступит оксида кальция из материала футеровки:

$$И_4 = \frac{M_4}{100} \cdot (\text{CaO})_4, \quad (6.9)$$

где  $(\text{CaO})_4$  – массовая доля оксида кальция в материале футеровки, 2%.  
Основность шлака принимаем равной 2,5:

$$B = \frac{И_3 + И_4}{K_{1,2} + K_2 + K_4 + K_3} = 2,5; \quad (6.10)$$

$$B = \frac{0,92 \cdot M_3 + 0,06}{7,16 + 6,5 + 0,048 + 0,025 \cdot M_3} = 2,5.$$

Отсюда расход извести свежееобожжённой:

$$И_3 = 39,89 \text{ кг.}$$

#### 4. Определение количества шлака.

Источниками шлака в процессе продувки кислородом являются:

- окисление шлакообразующих компонентов шихты ( $Ш_{1,2}$ );
- загрязнения металлического лома ( $Ш_2$ ),
- известь свежееобожжённая, вводимая в печь ( $Ш_3$ ),
- материал футеровки печи ( $Ш_4$ ),
- оксиды железа ( $Ш_5$ ).

Количество образующегося шлака:

$$M_7 = Ш_{1,2} + Ш_2 + Ш_3 + Ш_4 + Ш_5. \quad (6.11)$$

Продукты окисления металлической части шихты:

$$Ш_{1,2} = \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot (2,14 \cdot \Delta[\text{Si}] + 2,29 \cdot \Delta[\text{P}] + 1,29 \cdot \Delta[\text{Mn}]), \quad (6.12)$$

$$Ш_{1,2} = \frac{(170 + 830)}{100} \cdot (2,14 \cdot 0,329 + 2,29 \cdot 0,02285 + 1,29 \cdot 0,4655) = 13,57 \text{ кг.}$$

Загрязнения лома внесут в шлак:

$$\text{Ш}_2 = \frac{m \cdot (M_1 + M_2)}{10^4} \cdot [(\text{SiO}_2)_2 + (\text{Al}_2\text{O}_3)_2], \quad (6.13)$$

отсюда

$$\text{Ш}_2 = \frac{1 \cdot 1000}{10^4} \cdot (65 + 35) = 10 \text{ кг.}$$

Известь свежееобожённая внесёт в шлак:

$$\text{Ш}_3 = \frac{M_3}{100} \cdot [(\text{CaO})_3 + (\text{SiO}_2)_3 + (\text{Al}_2\text{O}_3)_3 + (\text{Fe}_2\text{O}_3)_3 + (\text{MgO})_3 + (\text{P}_2\text{O}_5)_3], \quad (6.14)$$

После подстановки данных получим:

$$\text{Ш}_3 = \frac{39,89}{100} \cdot (92 + 2,5 + 1,0 + 0,6 + 3,3 + 0,1) = 39,69 \text{ кг.}$$

Материалы футеровки внесут в шлак:

$$\text{Ш}_4 = \frac{M_4}{100} \cdot [(\text{SiO}_2)_4 + (\text{Al}_2\text{O}_3)_4 + (\text{MnO})_4 + (\text{MgO})_4 + (\text{CaO})_4 + (\text{P}_2\text{O}_5)_4], \quad (6.15)$$

отсюда

$$\text{Ш}_4 = \frac{3}{100} \cdot (1,6 + 0,3 + 95 + 2) = 2,97 \text{ кг.}$$

Оксиды железа внесут в шлак:

$$\text{Ш}_5 = \frac{M_7}{100} \cdot [(\text{FeO})_7 + (\text{Fe}_2\text{O}_3)_7], \quad (6.16)$$

тогда

$$\text{Ш}_5 = \frac{M_7}{100} \cdot (20 + 4) = 0,24 \cdot M_7.$$

Подставим это выражение в (6.11), получим, что общее количество шлака:

$$M_7 = \text{Ш}_{1,2} + \text{Ш}_2 + \text{Ш}_3 + \text{Ш}_4 + \text{Ш}_5,$$

$$M_7 = 13,57 + 10 + 39,69 + 2,97 + 0,24 \cdot M_7,$$

$$M_7 = 87,1 \text{ кг.}$$

##### 5. Определение выхода жидкой стали.

В процессе выплавки масса жидкого расплава уменьшается за счёт окисления С, Si, Mn, P, потерь железа со шлаком в виде оксидов железа и потерь железа с пылью, выносами и выбросами. Выход жидкой стали:

$$\begin{aligned} M_6 = M_1 + M_2 - \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot (\Delta[\text{C}] + \Delta[\text{Si}] + \Delta[\text{Mn}] + \Delta[\text{P}] - \\ - \frac{M_7}{100} \cdot [0,7 \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_7 + 0,78 \cdot (\text{FeO})_7] - \frac{e \cdot M_7}{100} - \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot (b + m) - \\ - \frac{M_9}{100} \cdot 0,7 \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3) + \frac{b \cdot (M_1 + M_2)}{10^4} \cdot [0,7 \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_2 + 0,78 \cdot (\text{FeO})_2] - M_{10}, \quad (6.17) \end{aligned}$$

где  $e$  – массовая доля корольков железа в шлаке, 1%;  $b$  – количество окалины лома, 2 %;  $m$  – количество загрязнений лома, 1%;  $M_{10}$  – потери металла с выносами и выбросами, 3%.

Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует  $M_9 = 10$  кг.

$$M_6 = 170 + 830 - \frac{(170 + 830)}{100} \cdot (0,8695 + 0,329 + 0,4655 + 0,02285) -$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{87,1}{100} \cdot (0,7 \cdot 4 + 0,78 \cdot 20) - \frac{1 \cdot 87,1}{100} - \frac{(170 + 830)}{100} \cdot (1 + 2) - \\
 & -\frac{10}{100} \cdot 0,7 \cdot 100 + \frac{2 \cdot (170 + 830)}{10^4} \cdot (0,7 \cdot 70 + 0,78 \cdot 30) - 30 = 913,7 \text{ кг.}
 \end{aligned}$$

Таким образом, выход жидкой стали равен 91,37%.

#### 6. Определение расхода газообразного кислорода.

Для процесса в дуговой сталеплавильной печи основным источником кислорода является технический чистый кислород, вдуваемый через фурму в ванну. Часть кислорода поступает из окалины металлолома. Кислород расходуется на окисление элементов шихты, окисление железа. Переходящего в шлак, и небольшая доля кислорода теряется с плавильной пылью. Баланс кислорода записывается следующим уравнением:

$$O_1 + O_2 = O_3 + O_4 + O_5, \quad (6.18)$$

где  $O_1$  – количество газообразного кислорода, поступающего на продувку;  $O_2$  – количество кислорода, поступающего из окалины скрапа;  $O_3$  – количество кислорода, необходимое на окисление примесей;  $O_4$  – количество кислорода, необходимое на образование оксидов железа, переходящих в шлак;  $O_5$  – количество кислорода, теряемое в виде плавильной пыли.

Количество кислорода, поступающего из окалины металлического лома

$$O_2 = \frac{b \cdot (M_1 + M_2)}{10^4} \cdot \left[ \frac{16}{72} \cdot (FeO)_2 + \frac{48}{160} \cdot (Fe_2O_3)_2 \right], \quad (6.19)$$

где  $b$  – количество окалины в ломе, 2%;  $(FeO)_2$  и  $(Fe_2O_3)_2$  – массовые доли оксидов железа в окалине, 30 и 70%.

$$O_2 = \frac{2 \cdot (170 + 830)}{10^4} \cdot [0,222 \cdot 30 + 0,3 \cdot 70] = 5,5 \text{ кг.}$$

Количество кислорода необходимое на окисление элементов:

$$\begin{aligned}
 O_3 = & \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot (1 - \eta) \cdot \Delta[C] \cdot \frac{16}{12} + \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \eta \cdot \Delta[C] \cdot \frac{32}{12} + \\
 & + \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \Delta[Si] \cdot \frac{32}{28} + \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \Delta[Mn] \cdot \frac{16}{55} + \\
 & + \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \Delta[P] \cdot \frac{80}{62}, \quad (6.20)
 \end{aligned}$$

где  $\eta$  – доля углерода, окисляющегося до  $CO_2$ , 0,1.

$$\begin{aligned}
 O_3 = & \frac{(170 + 830)}{100} \cdot (1 - 0,1) \cdot 0,8695 \cdot 1,3 + \frac{(170 + 830)}{100} \cdot 1 \cdot 0,8695 \cdot 2,6 + \\
 & + \frac{(170 + 830)}{100} \cdot 0,329 \cdot 1,14 + \frac{(170 + 830)}{100} \cdot 0,4655 \cdot 0,29 + \\
 & + \frac{(170 + 830)}{100} \cdot 0,02285 \cdot 1,29 = 17,9 \text{ кг.}
 \end{aligned}$$

Количество кислорода, необходимое на образование оксидов железа шлака:

$$O_4 = \frac{M_7}{100} \cdot [0,222 \cdot (FeO)_7 + 0,3 \cdot (Fe_2O_3)_7], \quad (6.21)$$

$$O_4 = \frac{87,14}{100} \cdot (0,222 \cdot 20 + 0,3 \cdot 4) = 4,88 \text{ кг.}$$

Количество кислорода, теряемое с пылью:

$$O_5 = \frac{M_9}{100} \cdot [0,3 \cdot (Fe_2O_3)] \quad (6.22)$$

где  $(Fe_2O_3)$  – массовая доля оксида железа в пыли, 100%.

$$O_5 = \frac{10}{100} \cdot (0,3 \cdot 100) = 3 \text{ кг.}$$

Количество технического кислорода, подаваемого в печь:

$$O_1 = \frac{M_5}{100} \cdot \{O_2\} \cdot K, \quad (6.23)$$

где  $\{O_2\}$  – массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, равная 99,5%;  $K$  – коэффициент усвоения кислорода, 0,9.

$$O_1 = \frac{M_5}{100} \cdot 99,5 \cdot 0,9 = 0,8955 \cdot M_5.$$

Подставим это выражение в (6.18), получим баланс кислорода:

$$O_1 + O_2 = O_3 + O_4 + O_5,$$

$$0,8955 \cdot M_5 + 5,5 = 17,9 + 4,88 + 3$$

$$M_5 = 22,65 \text{ кг.}$$

$$O_1 = 0,8955 \cdot 22,64 = 20,28 \text{ кг.}$$

Тогда баланс кислорода равен:

$$O_1 + O_2 = O_3 + O_4 + O_5,$$

$$20,28 + 5,5 = 17,9 + 4,88 + 3.$$

## 7. Определение количества отходящих газов.

В процессе продувки в дуговой сталеплавильной печи образуются газы:

- за счёт окисления углерода шихты ( $\Gamma_1$ );
- за счёт разложения извести свежееобожжённой ( $\Gamma_2$ ).

В атмосфере печи присутствуют азот и неусвоенный кислород технического кислорода ( $\Gamma_3$ ).

Общее количество газов определяется по формуле:

$$M_8 = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3. \quad (6.24)$$

При этом за счёт окисления шихты:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= 2,33 \cdot \Delta[C] \cdot \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot (1 - \eta) + 3,67 \cdot \Delta[C] \cdot \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \eta = \\ &= \frac{(M_1 + M_2)}{100} \cdot \Delta[C] \cdot (2,33 + 1,34 \cdot \eta), \end{aligned} \quad (6.25)$$

$$\Gamma_1 = 2,33 \cdot 0,8695 \cdot 10 \cdot 0,9 + 3,67 \cdot 0,8695 \cdot 10 \cdot 0,1 = 21,42 \text{ кг.}$$

За счёт разложения извести:

$$\Gamma_2 = \frac{M_3}{100} \cdot (\{CO_2\} + \{H_2O\}); \quad (6.26)$$

$$\Gamma_2 = \frac{39,89}{100} \cdot (0,2 + 0,2) = 0,15 \text{ кг.}$$

Количество азота и неусвоенного кислорода технического кислорода определяется по формуле:

$$\Gamma_3 = \frac{M_5}{100} \cdot (1 - K) \cdot \{O_2\} + \frac{M_5}{100} \cdot N_2; \quad (6.27)$$

$$\Gamma_3 = \frac{22,65}{100} \cdot (1 - 0,9) \cdot 99,5 + \frac{22,65}{100} \cdot 0,5 = 2,37 \text{ кг,}$$

где  $\{N_2\}$  – массовая доля азота в технически чистом кислороде, равная 0,5%.  
Подставим это выражение в (6.24), получим общее количество газов:

$$M_8 = G_1 + G_2 + G_3.$$

$$M_8 = 21,42 + 0,15 + 2,37 = 23,94 \text{ кг.}$$

Тогда материальный баланс равен:

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 = M_6 + M_7 + M_8 + M_9 + M_{10},$$

$$170 + 830 + 39,89 + 3 + 22,65 = 913,7 + 87,1 + 23,9 + 10 + 0,871 + 30$$

Материальный баланс плавки представлен в таблице 6.4.

Таблица 6.4.

Материальный баланс плавки в ДСП-150

Приход	кг	%	Расход	кг	%
Чугун	170	15,59	Сталь	913,7	85,75
Металлолом	830	77,9	Шлак	87,1	8,2
Известь свежееобожённая	39,89	3,74	Газы	23,9	2,22
Кислород	22,65	2,13	Потери		
Футеровка	3	0,28	С пылью	10	0,94
			С корольками в шлаке	0,871	0,08
			С выносами и выбросами	30	2,81
Итого	1065,54	100	Итого	1065,54	100

### 6.4. Варианты заданий

#### Вариант 1.

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30%. Масса плавки 100 т. Расход металлического лома ЗАЭ (ГОСТ 1050-88) Сталь 25 составляет 79,2% или 792 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009) Железо, восстановленное газом составляет 20,8% или 208 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окалины лома составляет 2%; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окалине  $(FeO)_2$  30% и  $(Fe_2O_3)_2$  70%. Доля углерода, окисляющегося до  $CO_2$  составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.5 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.5

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Ni	Cu
	Не более									

ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009)	1,8386	-	-	-	-	-	0,0018			
----------------------------	--------	---	---	---	---	---	--------	--	--	--

Продолжение таблицы 6.5

ЗАЭ ДСП Сталь 25 (ГОСТ 1050-88)	0,25	0,22	0,6	0,25	0,021	-	0,04	0,035	0,3	0,3
Средний состав шихты	0,4216	0,196	0,535	0,223	0,02	-	0,0359	0,031	0,268	0,268
Состав стали перед выпуском	0,073	0,005	0,046	0,089	0,02	-	0,0430	0,0033	0,440	0,220
Окислилось примесей	0,347	0,191	0,489	0,134	-	-	0,0071	0,0277	0,172	0,48

Таблица 6.6

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Известь ТУ 20.59.56-001-09560019-2017	85	-	-	5	-	4	6	-	-
Футеровка ДСП	2,0	1,6	0,3	90	-	-	-	-	-
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-

**Вариант 2.**

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 % в завалку подаётся пакет стальной (ГОСТ 1050-2013) сталь 0,8 составляет 26,59 % или 265,9 кг/т на плавку. Масса плавки 90 т. Расход стального лома ЗА ДСП сталь 05кп составляет 18,09 или 180,9 кг/т металлошихты. Расход стального лома ЗАЖД (ГОСТ Р51685-2000) Сталь К78ХСФ составляет 16,21% или 162,1 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686- 2009) Сталь Р50 составляет 14,02% или 140,2 кг/т металлошихты. Расход лома стального ЗАЭ (ГОСТ 380-94) Сталь 3пс составляет 11,85 % или 118,5 кг/т металлошихты. Расход стружки стальной 15А (ГОСТ 1050 2013) Сталь 10 составляет 7,17 % или 71,7 кг/т металлошихты. Расход скрапа 25А1 составляет 6,07% или 60,7 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окалина лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окалине (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.7 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.8.

Таблица 6.7

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей, %								
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	Другие элементы
Состав стали 38Г2СФ-4 ГОСТ 632 ТУ 14-ЗР-29	0,37-0,39	0,40-0,45	1,30-1,42	-	0,030	0,03	0,30	0,30	

Продолжение таблицы 6.7

Пакет стальной (ГОСТ 1050-2013) сталь 08	0,05-0,12	0,17-0,37	0,35-0,65	Не более 0,10	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Лом и отходы стальные, углеродистые ЗА ДСП (ГОСТ 1050- 2013) Сталь 05кп	Не более 0,06	Не более 0,03	Не более 0,40	Не более 0,10	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Лом стальной ЗАЖД (ГОСТ P51685-2000) Сталь К78ХСФ	0,74-0,82	0,05-0,15	0,75-1,15	0,4-0,6	0,025	0,025	-	-	V=0,05-0,15
Горячее брикетированное железо ГБЖ (ГОСТ P ИСО 9686- 2009) Сталь P50	1,8386	-	-	-	0,0018	-	-	-	-
Лом стальной ЗАЭ (ГОСТ 380-94) Сталь Зпс	0,14-0,22	0,05-0,15	0,40-0,65	-	-	-	-	-	-
Стружка стальная 15А (ГОСТ 1050 2013) Сталь 10	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	Не более 0,015	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Скрап 25А1	0,37-0,39	0,40-0,45	1,30-1,42	-	0,030	0,30	0,30	0,30	V=0,05

Продолжение таблицы 6.7

Средний состав шихты	0,838	0,551	1,427	0,232	0,062	0,056	0,526	0,526	-
Состав стали перед выпуском	0,093	0,006	0,083	0,067	0,051	0,0087	0,100	0,154	V=0,002
Окислилось примесей	0,745	0,545	1,344	0,165	0,011	0,047	0,426	0,372	

Таблица 6.8

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Известь свежееобожжённая	92	2,5	1,0	3,3	0,1	0,2	0,2	0,6	0,1
Футеровка ДСП	2,0	1,6	0,3	95	-	-	-	-	-
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-

**Вариант 3.**

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 %. Масса плавки 120 т. Расход металлического лома ЗАЭ (ГОСТ 1050-88) Сталь 35 составляет 73,78 % или 737,8 кг/т металлошихты. Расход металлического лома и отходов ЗА ДСП (ГОСТ 1050-2013) Сталь 20 пс составляет 4,37 % или 43,7 кг/т металлошихты. Расход металлического лома и отходов ЗА ЖД (ГОСТ Р 51685-2000) Сталь 32Г2А составляет 6,01 % или 60,1 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686- 2009) Железо, восстановленное газом составляет 12,74 % или 127,4 кг/т металлошихты. Расход металлического лома 25А1 (ГОСТ 4543) Сталь 15ХМ составляет 3,1 % или 31 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окалина лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окалине (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.9 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.10.

Таблица 6.9

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr
------------------	---	----	----	---	---	----	----	----



## Metallurgical calculations

Состав стали 32ГФА ГОСТ 632 ТУ 14-ЗР-29	0,340-0,370	0,170-0,300	1,300-1,450	0,0100	0,0170	0,300	0,300	0,250
Лом стальной ЗАЭ Сталь 35 ГОСТ 1050-88	0,32-0,4	0,17-0,37	0,5-0,8	0,040	0,035	0,25	0,25	0,25

Продолжение таблицы 6.9

Лом и отходы стальные, углеродистые ЗА ДСП (ГОСТ 1050-2013) Сталь 20пс	0,17-0,24	0,05-0,17	0,35-0,65	0,04	0,035	0,30	0,30	0,25
Горячее брикетированное железо ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009) Сталь Р50	1,8386	-	-	0,0018	-	-	-	-
Лом стальной ЗАЖД (ГОСТ Р 51685-2000) Сталь 32Г2А	0,30-0,35	0,20-0,35	1,25-1,45	0,015	0,020	0,30	0,30	Не более 0,30
Скрап 25А1 (ГОСТ 4543) Сталь 15ХМ	0,11-0,18	0,17-0,37	0,4-0,7	0,035	0,035	0,30	0,30	0,8-1,1
Средний состав шихты	0,5355	0,23	0,634	0,0334	0,03	0,224	0,224	0,24
Состав стали перед выпуском	0,330	0,270	1,400	0,0078	0,0059	0,081	0,190	0,074
Окислилось Примесей	0,2055	-0,04	-0,766	0,0256	0,0241	0,143	0,034	0,166

Таблица 6.10

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C
Известняк (ГОСТ 9179-77)	85	-	-	5	-	4	6	-	-	
Футеровка ДСП Марка ПУПК-90-7 (ГОСТ 5341-2016)	-	-	-	90	-	-	-	-	-	10

Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-
------------------	---	----	----	---	---	---	---	---	---

**Вариант 4.**

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 %. Масса плавки 145 т. Расход металлического лома ЗАН-1 (ГОСТ 19281-89) Сталь 15ГС составляет 74,0 % или 740 кг/т металлошихты. Расход металлического лома ЗА ДСП (ГОСТ 1050-88) Сталь 25 составляет 10,2 % или 102 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009) Железо, восстановленное газом составляет 12,90 % или 129,0 кг/т металлошихты. Расход металлического лома 25А1 (ГОСТ 4543) Сталь 15ХМ составляет 2,9 % или 29 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окалины лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окалине (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.11 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.11

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Ni	Cu
Состав стали 32ХГА(4355) по СТО ТАГМЕТ 00186602-003-2017	0,34	0,3	0,850	1,150	0,05	-	0,01	0,035	0,3	0,3
ЗАН-1 Сталь 15ГС (ГОСТ 19281-89)	0,16	0,8	1	0,3	-	-	0,025	0,035	0,3	0,3
ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009)	1,8386	-	-	-	-	-	0,0018	-	-	-
ЗА ДСП Сталь 25 (ГОСТ 1050-88)	0,25	0,22	0,6	0,25	-	-	0,04	0,035	0,3	0,3
Средний состав шихты	0,377	0,529	0,720	0,229	-	-	0,0023	0,028	0,238	0,238
Состав стали перед выпуском	0,0850	0,0110	0,0420	0,0530	-	-	0,0500	0,0048	0,0720	0,230
Окислилось Примесей	0,2918	0,518	0,55	0,1758	-	-	-	0,0230	0,1659	0,0079

Таблица 6.12

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C
Известь строительная	85	-	-	5	-	4	6	-	-	
Футеровка ДСП	-	-	-	90	-	-	-	-	-	7-10
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-	-

### Вариант 5.

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 %. Масса плавки 120 т. Расход металлического лома ЗАЭ (ГОСТ 1050-88) Сталь 25 составляет 89,2 % или 892 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686- 2009) Железо, восстановленное газом составляет 10,8 % или 108 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окислы лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окислы (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.13 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.14.

Таблица 6.13

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Ni	Cu
ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009)	1,8386	-	-	-	-	-	0,0018			
ЗАЭ ДСП Сталь 25 (ГОСТ 1050-88)	0,25	0,22	0,6	0,25	0,021	-	0,04	0,035	0,3	0,3
Средний состав шихты	0,4216	0,196	0,535	0,223	0,02	-	0,0359	0,031	0,268	0,268
Состав стали перед выпуском	0,073	0,005	0,046	0,089	0,02	-	0,0430	0,0033	0,440	0,220
Окислилось примесей	0,347	0,191	0,489	0,134	-	-	0,0071	0,0277	0,172	0,48

Таблица 6.14

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Composition, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Известь ТУ 20.59.56-001-09560019-2017	85	-	-	5	-	4	6	-	-
Футовка ДСП	2,0	1,6	0,3	90	-	-	-	-	-
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-

### Variant 6.

Calculation of the material balance is carried out for 1 t of metal scrap. In the production of the selected brand of steel with a regulated content of impurities of colored metals Cu, Ni not more than 0,30% in the scrap, a package of steel (GOST 1050-2013) steel 0,8 constitutes 22,59% or 225,9 kg/t of the melt. The mass of the melt is 150 t. The consumption of steel scrap 3A DSP steel 05kp constitutes 15,09 or 150,9 kg/t of metal scrap. The consumption of steel scrap 3AZD (GOST P51685-2000) Steel K78XCF constitutes 15,21% or 152,1 kg/t of metal scrap. The consumption of GBJ (GOST P ISO 9686-2009) Steel P50 constitutes 18,02% or 180,2 kg/t of metal scrap. The consumption of steel scrap 3AE (GOST 380-94) Steel 3ps constitutes 12,85% or 128,5 kg/t of metal scrap. The consumption of steel scrap 15A (GOST 1050 2013) Steel 10 constitutes 8,13% or 81,7 kg/t of metal scrap. The consumption of scrap 25A1 constitutes 8,07% or 80,7 kg/t of metal scrap. The amount of DSP, which goes to slag, is 3 kg/t of metal scrap. The mass fraction of iron in the slag is 1%; the amount of iron oxide is 2%; the amount of impurities of iron is 1%; the losses of metal with outflows and outflows are 3%. Dust is 1% of the mass of scrap, which corresponds to 10 kg. Mass fractions of iron oxides in the slag are (FeO)<sub>2</sub> 30% and (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. The share of carbon, which is oxidized to CO<sub>2</sub>, is 0,1. The mass fraction of iron oxide in the dust is 100. The mass fraction of oxygen in technical oxygen is 99,5%; the coefficient of oxygen utilization is 0,9. The mass fraction of nitrogen in technical oxygen is 0,5%.

In table 6.15, the average composition of scrap materials, the amount of removed impurities, the composition of metal before release. Data on the composition of various materials, which participate in slag formation, are given in table 6.16.

Таблица 6.15

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей, %								
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	Другие элементы
Состав стали 38Г2СФ-4 ГОСТ 632 ТУ 14-3Р-29	0,37-0,39	0,40-0,45	1,30-1,42	-	0,030	0,03	0,30	0,30	
Пакет стальной (ГОСТ 1050-2013) сталь 08	0,05-0,12	0,17-0,37	0,35-0,65	Не более 0,10	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Лом и отходы стальные, углеродистые ЗА ДСП (ГОСТ 1050- 2013) Сталь 05кп	Не более 0,06	Не более 0,03	Не более 0,40	Не более 0,10	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Лом стальной ЗАЖД (ГОСТ P51685-2000) Сталь К78ХСФ	0,74-0,82	0,05-0,15	0,75-1,15	0,4-0,6	0,025	0,025	-	-	V=0,05-0,15
Горячее брикетированное железо ГБЖ (ГОСТ P ИСО 9686- 2009) Сталь P50	1,8386	-	-	-	0,0018	-	-	-	-
Лом стальной ЗАЭ (ГОСТ 380-94) Сталь Зпс	0,14-0,22	0,05-0,15	0,40-0,65	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 6.15

Стружка стальная 15А (ГОСТ 1050 2013) Сталь 10	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	Не более 0,015	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Скрап 25А1	0,37-0,39	0,40-0,45	1,30-1,42	-	0,030	0,30	0,30	0,30	V=0,05
Средний состав шихты	0,838	0,551	1,427	0,232	0,062	0,056	0,526	0,526	-
Состав стали перед выпуском	0,093	0,006	0,083	0,067	0,051	0,0087	0,100	0,154	V=0,002
Окислилось примесей	0,745	0,545	1,344	0,165	0,011	0,047	0,426	0,372	

Таблица 6.16

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Известь свежеобожжённая	92	2,5	1,0	3,3	0,1	0,2	0,2	0,6	0,1
Футеровка ДСП	2,0	1,6	0,3	95	-	-	-	-	-
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-

**Вариант 7.**

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 %. Масса плавки 100 т. Расход металлического лома ЗАЭ (ГОСТ 1050-88) Сталь 35 составляет 71,78 % или 717,8 кг/т металлошихты. Расход металлического лома и отходов ЗА ДСП (ГОСТ 1050-2013) Сталь 20 пс составляет 7,37 % или 73,7 кг/т металлошихты. Расход металлического лома и отходов ЗА ЖД (ГОСТ Р 51685-2000) Сталь 32Г2А составляет 6,51 % или 65,1 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009) Железо, восстановленное газом составляет 12,24 % или 122,4 кг/т металлошихты. Расход металлического лома 25А1 (ГОСТ 4543) Сталь 15ХМ составляет 2,1 % или 21 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окалина лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окалине (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом

кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.17 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.18.

Таблица 6.17

## Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr
Состав стали 32ГФА ГОСТ 632 ТУ 14-ЗР-29	0,340-0,370	0,170-0,300	1,300-1,450	0,0100	0,0170	0,300	0,300	0,250
Лом стальной ЗАЭ Сталь 35 ГОСТ 1050-88	0,32-0,4	0,17-0,37	0,5-0,8	0,040	0,035	0,25	0,25	0,25
Лом и отходы стальные, углеродистые ЗА ДСП (ГОСТ 1050-2013) Сталь 20пс	0,17-0,24	0,05-0,17	0,35-0,65	0,04	0,035	0,30	0,30	0,25
Горячее брикетированное железо ГБЖ (ГОСТ РИСО 9686-2009) Сталь Р50	1,8386	-	-	0,0018	-	-	-	-
Лом стальной ЗАЖД (ГОСТ Р51685-2000) Сталь 32Г2А	0,30-0,35	0,20-0,35	1,25-1,45	0,015	0,020	0,30	0,30	Не более 0,30

Продолжение таблицы 6.17

Скрап 25А1 (ГОСТ 4543) Сталь 15ХМ	0,11-0,18	0,17-0,37	0,4-0,7	0,035	0,035	0,30	0,30	0,8-1,1
Средний состав шихты	0,5355	0,23	0,634	0,0334	0,03	0,224	0,224	0,24
Состав стали перед выпуском	0,330	0,270	1,400	0,0078	0,0059	0,081	0,190	0,074
Окислилось Примесей	0,2055	-0,04	-0,766	0,0256	0,0241	0,143	0,034	0,166

Таблица 6.18

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C
Известняк (ГОСТ 9179-77)	85	-	-	5	-	4	6	-	-	
Фуеровка ДСП Марка ПУПК-90-7 (ГОСТ5341-2016)	-	-	-	90	-	-	-	-	-	10
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-	-

### Вариант 8.

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 %. Масса плавки 180 т. Расход металлического лома ЗАН-1 (ГОСТ 19281-89) Сталь 15ГС составляет 78,0 % или 780 кг/т металлошихты. Расход металлического лома ЗА ДСП (ГОСТ 1050-88) Сталь 25 составляет 8,2 % или 82 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686- 2009) Железо, восстановленное газом составляет 10,90 % или 109,0 кг/т металлошихты. Расход металлического лома 25А1 (ГОСТ 4543) Сталь 15ХМ составляет 2,9 % или 29 кг/т металлошихты. Количество фуеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окислы лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окислы (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.19 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.20.

Таблица 6.19

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Ni	Cu
							Не более			
Состав стали 32ХГА(4355) по СТО ТАГМЕТ 00186602-003- 2017	0,34	0,3	0,850	1,150	0,05	-	0,01	0,035	0,3	0,3
ЗАН-1 Сталь 15ГС (ГОСТ 19281-89)	0,16	0,8	1	0,3	-	-	0,025	0,035	0,3	0,3



Продолжение таблицы 6.19

ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009)	1,8386	-	-	-	-	-	-	0,0018	-	-	-
ЗА ДСП Сталь 25 (ГОСТ 1050-88)	0,25	0,22	0,6	0,25	-	-	0,04	0,035	0,3	0,3	-
Средний состав шихты	0,377	0,529	0,720	0,229	-	-	0,0023	0,028	0,238	0,238	-
Состав стали перед выпуском	0,0850	0,0110	0,0420	0,0530	-	-	0,0500	0,0048	0,0720	0,230	-
Окислилось Примесей	0,2918	0,518	0,55	0,1758	-	-	-	0,0230	0,1659	0,0079	-

Таблица 6.20

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %										
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C	
Известь строительная	85	-	-	5	-	4	6	-	-		
Футеровка ДСП	-	-	-	90	-	-	-	-	-	7-10	
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-	-	

**Вариант 9.**

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 %. Масса плавки 150 т. Расход металлического лома ЗАЭ (ГОСТ 1050-88) Сталь 25 составляет 92,2 % или 922 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009) Железо, восстановленное газом составляет 7,8 % или 78 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окалины лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окалине (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.21 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.22.

Таблица 6.21

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей, %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	S	P	Ni	Cu	Не более

ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686-2009)	1,8386	-	-	-	-	-	0,0018		
ЗАЭ ДСП Сталь 25 (ГОСТ 1050-88)	0,25	0,22	0,6	0,25	0,021	-	0,04	0,035	0,3
Средний состав шихты	0,4216	0,196	0,535	0,223	0,02	-	0,0359	0,031	0,268

Продолжение таблицы 6.21

Состав стали перед выпуском	0,073	0,005	0,046	0,089	0,02	-	0,0430	0,0033	0,440
Окислилось примесей	0,347	0,191	0,489	0,134	-	-	0,0071	0,0277	0,48

Таблица 6.22

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Известь ТУ 20.59.56-001-09560019-2017	85	-	-	5	-	4	6	-	-
Футеровка ДСП	2,0	1,6	0,3	90	-	-	-	-	-
Загрязнения лома	-	65	35	-	-	-	-	-	-

**Вариант 10.**

Расчёт материального баланса ведётся на 1 т металлошихты. При производстве выбранной марки стали с регламентируемым содержанием примесей цветных металлов Cu, Ni не более 0,30 % в завалку подаётся пакет стальной (ГОСТ 1050-2013) сталь 0,8 составляет 22,59 % или 225,9 кг/т на плавку. Масса плавки 120 т. Расход стального лома ЗА ДСП сталь 05кп составляет 19,09 или 190,9 кг/т металлошихты. Расход стального лома ЗАЖД (ГОСТ Р51685-2000) Сталь К78ХСФ составляет 17,21% или 172,1 кг/т металлошихты. Расход ГБЖ (ГОСТ Р ИСО 9686- 2009) Сталь Р50 составляет 15,02% или 150,2 кг/т металлошихты. Расход лома стального ЗАЭ (ГОСТ 380-94) Сталь 3пс составляет 10,85 % или 108,5 кг/т металлошихты. Расход стружки стальной 15А (ГОСТ 1050 2013) Сталь 10 составляет 8,67 % или 86,7 кг/т металлошихты. Расход скрапа 25А1 составляет 6,57% или 65,7 кг/т металлошихты. Количество футеровки, перешедшей в шлак, 3 кг/т металлошихты. Массовая доля корольков железа в шлаке составляет 1%; количество окалина лома составляет 2 %; количество загрязнений лома составляет 1%; потери металла с выносами и выбросами составляют 3%. Пыли выделяется 1% от массы шихты, что соответствует 10 кг. Массовые доли оксидов железа в окалине (FeO)<sub>2</sub> 30% и (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 70%. Доля углерода, окисляющегося до CO<sub>2</sub> составляет 0,1. Массовая доля оксида железа в пыли составляет 100. Массовая доля кислорода в технически чистом кислороде, составляет 99,5%; коэффициент усвоения кислорода равен 0,9. Массовая доля азота в технически чистом кислороде, составляет 0,5%.

В табл. 6.23 отражается средний состав шихтовых материалов, количество удалённых примесей, состав металла перед выпуском. Данные о составе различных материалов, участвующих в шлакообразовании, приведены в табл. 6.24.

Таблица 6.23

Изменение состава при выплавке стали

Компоненты шихты	Содержание примесей, %								Другие элементы
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	
Состав стали 38Г2СФ-4 ГОСТ 632 ТУ 14-3Р-29	0,37-0,39	0,40-0,45	1,30-1,42	-	0,030	0,03	0,30	0,30	V=0,05 Mo=0,03
Пакет стальной (ГОСТ 1050-2013) сталь 08	0,05-0,12	0,17-0,37	0,35-0,65	Не более 0,10	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Лом и отходы стальные, углеродистые ЗА ДСП (ГОСТ 1050- 2013) Сталь 05кп	Не более 0,06	Не более 0,03	Не более 0,40	Не более 0,10	0,035	0,30	0,30	0,30	-

Продолжение таблицы 6.23

Лом стальной ЗАЖД (ГОСТ P51685-2000) Сталь K78ХСФ	0,74-0,82	0,05-0,15	0,75-1,15	0,4-0,6	0,025	0,025	-	-	V=0,05-0,15
Горячее брикетированное железо ГБЖ (ГОСТ P ИСО 9686- 2009) Сталь P50	1,8386	-	-	-	0,0018	-	-	-	-
Лом стальной ЗАЭ (ГОСТ 380-94) Сталь Зпс	0,14-0,22	0,05-0,15	0,40-0,65	-	-	-	-	-	-
Стружка стальная 15А (ГОСТ 1050 2013) Сталь 10	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	Не более 0,015	0,035	0,30	0,30	0,30	-
Скрап 25А1	0,37-0,39	0,40-0,45	1,30-1,42	-	0,030	0,30	0,30	0,30	V=0,05
Средний состав шихты	0,838	0,551	1,427	0,232	0,062	0,056	0,526	0,526	-
Состав стали перед выпуском	0,093	0,006	0,083	0,067	0,051	0,0087	0,100	0,154	V=0,002

Окислилось примесей	0,745	0,545	1,344	0,165	0,011	0,047	0,426	0,372	
------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--

Таблица 6.24

Состав различных материалов, принимающих участие в шлакообразовании

	Состав, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Известь свежеобожжённая	92	2,5	1,0	3,3	0,1	0,2	0,2	0,6	0,1
Футеровка ДСП	2,0	1,6	0,3	95	–	–	–	–	–
Загрязнения лома	–	65	35	–	–	–	–	–	–

### 6.5. Перечень использованных информационных ресурсов

1. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Metallurgy, 1987. – 270 с.
2. Казачков Е.А. Расчёты по теории металлургических процессов: учеб. пособие для вузов / Е.А. Казачков. – М.: Metallurgy, 1988. – 288 с.
3. Кем А.Ю. Металлургические технологии и безопасность процессов. Производство стали в дуговых сталеплавильных печах: теория, технология, расчёты / Кем А.Ю. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2015. – 143 с.

## Приложение 1

Температурная зависимость констант реакции раскисления железа различными элементами-раскислителями  $\lg K = \lg \frac{a_{Rn}^R \cdot a_O^m}{a_{Rn-Om}} = \frac{A}{T} + B$

Реакция	$\lg K = \frac{A}{T} + B$		R, %
	A	B	
$\text{CaO} = [\text{Ca}] + [\text{O}]$	- 33865	7,60	-
$\text{CaO} = \text{Ca}_T + [\text{O}]$	- 35000	10,33	-
$\text{BaO} = [\text{Ba}] + [\text{O}]$	- 31380	7,65	-
$\text{BaO} = \text{Ba}_T + [\text{O}]$	- 30950	9,10	-
$\text{Ce}_2\text{O}_3 = 2[\text{Ce}] + 3[\text{O}]$	- 76000	21,00	-
$\text{CeO}_2 = [\text{Ce}] + 2[\text{O}]$	- 53750	16,70	-
$\text{La}_2\text{O}_3 = 2[\text{La}] + 3[\text{O}]$	- 77300	20,79	-
$\text{Y}_2\text{O}_3 = 2[\text{Y}] + 3[\text{O}]$	- 72300	17,58	-
$\text{ZrO}_2 = [\text{Zr}] + 2[\text{O}]$	- 41340	12,07	-
$\text{Al}_2\text{O}_3 = 2[\text{Al}] + 3[\text{O}]$	- 64900	20,63	-
$\text{TiO}_2 = [\text{Ti}] + 2[\text{O}]$	- 30900	10,40	< 0,01
$\text{Ti}_3\text{O}_5 = 3[\text{Ti}] + 5[\text{O}]$	- 87170	31,08	0,01 – 0,2
$\text{Ti}_2\text{O}_3 = 2[\text{Ti}] + 3[\text{O}]$	- 28950	7,42	0,2 - 4
$\text{TiO} = [\text{Ti}] + [\text{O}]$	- 17860	6,55	> 5
$\text{SiO}_2 = [\text{Si}] + 2[\text{O}]$	- 30720	11,76	> 0,2
$\text{V}_2\text{O}_3 = 2[\text{V}] + 3[\text{O}]$	- 42610	16,86	> 0,3
$\text{NbO}_2 = [\text{Nb}] + 2[\text{O}]$	- 28780	11,83	> 0,2
$\text{MnO} = [\text{Mn}] + [\text{O}]$	- 15200	6,78	-
$\text{Cr}_2\text{O}_3 = 2[\text{Cr}] + 3[\text{O}]$	- 43140	18,63	6 - 16
$\text{CO} = [\text{C}] + [\text{O}]$	- 1168	- 2,07	-
$\text{FeO} = \text{Fe}_T + [\text{O}]$	- 6317	2,734	-