

№ 380

Е.С. Михалина

А.Л. Петелин

# **Термодинамика и кинетика металлургических процессов**

Окислительно-восстановительные системы

Учебное пособие

**№ 380**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра экстракции и рециклинга черных металлов

Е.С. Михалина

А.Л. Петелин

# **Термодинамика и кинетика металлургических процессов**

Окислительно-восстановительные системы

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлению Металлургия



**ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ**

Москва 2011

УДК 669.02/.09  
М69

Рецензент  
канд. физ.-мат. наук, доц. *А.С. Родин*

**Михалина, Е.С.**

М69 Термодинамика и кинетика металлургических процессов : окислительно-восстановительные системы : учеб. пособие / Е.С. Михалина, А.Л. Петелин. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. – 56 с.

ISBN 978-5-87623-461-2

Пособие является продолжением курса лекций «Термодинамика и кинетика металлургических процессов». Подробно рассмотрены окислительно-восстановительные системы металлургических процессов и процессы, происходящие в этих системах, основные законы газовой кинетики, основные законы газовой диффузии, кинетика многостадийных процессов. Особое внимание уделяется анализу диаграммы состояния железо–кислород.

Для студентов специальностей 150101, 150109.

**УДК 669.02/.09**

**ISBN 978-5-87623-461-2**

© Михалина Е.С.,  
Петелин А.Л., 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Термодинамика металлургических процессов.	
Окислительно-восстановительные системы .....	4
1.1. Фазовое равновесие. Общие понятия. Сложное равновесие окислительно-восстановительных систем.....	4
1.2. Практические методы расчета сложного равновесия окислительно-восстановительных систем.....	11
1.3. Горение топлива .....	21
1.4. Адиабатическая температура горения топлива .....	24
2. Кинетика процессов в окислительно-восстановительных металлургических системах .....	34
2.1. Диффузия.....	34
2.2. Газовая диффузия .....	39
2.3. Кинетика в газовых средах. Кинетика многостадийных процессов.....	41
3. Фазовая диаграмма системы железо–кислород .....	47
Контрольные вопросы для самоподготовки .....	50
Библиографический список .....	55

# 1. ТЕРМОДИНАМИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

## 1.1. Фазовое равновесие. Общие понятия. Сложное равновесие окислительно-восстановительных систем

*Фазовое равновесие* – это сосуществование термодинамически равновесных фаз гетерогенной системы. Является одним из основных случаев термодинамического равновесия и включает в себя условия равенства температуры всех частей системы (*термическое равновесие*), равенства давления во всем объеме системы (*механическое равновесие*) и равенство химических потенциалов каждого компонента во всех фазах системы, что обеспечивает равновесное распределение компонентов между фазами.

Число фаз  $f$ , находящихся одновременно в равновесии, связано с числом компонентов  $k$ , числом  $n$  независимых параметров, определяющих состояние системы (обычно, когда учитывается только влияние температуры и давления,  $n = 2$ ) и числом термодинамических степеней свободы  $\nu$  уравнением  $\nu = k + 2 - f$ .

В общем виде *условие фазового равновесия*, согласно принципу равновесия Гиббса, сводится к максимуму энтропии  $S$  системы при постоянстве внутренней энергии  $U$ , общего объема  $V$  и числа молей каждого компонента  $n_i$ . Этот принцип можно выразить также как условие минимума любого из термодинамических потенциалов: внутренней энергии  $U$ , энтальпии  $H$ , энергии Гиббса  $G$ , энергии Гельмгольца  $A$  при условии постоянства соответствующих параметров состояния, включая число молей каждого компонента.

Фазовое равновесие может быть стабильным и метастабильным. То и другое являются локально устойчивыми, т.е. устойчивыми по отношению к малым возмущениям параметров состояния – температуры, давления, состава (концентраций компонентов). *Метастабильные фазовые равновесия* отличаются тем, что они неустойчивы к некоторым конечным изменениям этих параметров, ведущим, в частности, к переходу к другим фазам. Например, пересыщенный раствор или переохлажденный расплав неустойчивы по отношению к кристаллической фазе. Поскольку метастабильное состояние системы локально устойчиво, переход к стабильному состоянию требует