

В. Е. РОЩИН, А. В. РОЩИН

# ФИЗИКА

ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ

ПРОЦЕССОВ



Рощин В. Е., Рощин А. В.

# **ФИЗИКА ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Учебник*

*Допущено федеральным учебно-методическим объединением по укрупненной группе специальностей и направлений 22.00.00 «Технологии материалов» в качестве учебника при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» соответственно, а также при подготовке аспирантов, обучающихся по направлению 22.00.00 «Технологии материалов»*

Москва    Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 669.017  
ББК 34.2  
P58

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В. А. Бигеев*;  
доктор технических наук, профессор *Г. В. Галевский*;  
доктор технических наук, профессор *О. Ю. Шешуков*

**Рощин, В. Е.**

**P58** Физика пирометаллургических процессов : учебник / В. Е. Рощин, А. В. Рощин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 304 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0701-4

Изложены основы физических процессов образования вещества и появления металличности во Вселенной, причины проявления у вещества металлургических свойств и происхождения металлов на Земле, описаны физические явления на электронном уровне при нагреве, плавлении, отвердевании и кристаллизации металлов. Проанализированы процессы электронного и ионного обмена в химических реакциях, протекающих в восстановительных агрегатах при пирометаллургическом извлечении металлов из руд.

Для студентов и аспирантов металлургических направлений подготовки. Может быть полезно исследователям процессов в области доменного, сталеплавильного и ферросплавного производств, а также практикам металлургической и машиностроительной промышленности.

УДК 669.017  
ББК 34.2

ISBN 978-5-9729-0701-4

© Рощин В. Е., Рощин А. В., 2021  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	6
<b>Раздел I. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕТАЛЛАХ И ФИЗИКЕ ПРОЦЕССОВ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ</b>	
<b>Глава 1. Развитие пирометаллургии от неолита до наших дней</b>	
1.1. Эволюция представлений о металлах .....	7
1.2. Краткая история пирометаллургии.....	10
1.3. Получение расплавленного железа и литой стали .....	15
1.4. Современные способы производства сплавов железа .....	20
1.5. Проблемы и нерешённые вопросы пирометаллургии железа.....	24
<b>Глава 2. Развитие представлений о происхождении и структуре вещества</b>	
2.1. Роль пирометаллургии в зарождении науки о веществе .....	30
2.2. Развитие науки о структуре вещества .....	33
2.3. Элементарные частицы вещества и взаимодействий.....	35
2.4. Неклассическая физика XX века .....	41
2.5. Античастицы и антивещество .....	44
2.6. Причины и масштабы агрегации вещества во Вселенной.....	46
2.7. Хронология появления и агрегации вещества.....	49
2.8. Образование химических элементов, присутствующих на Земле ...	56
<b>Глава 3. Агрегация вещества под влиянием электромагнитного взаимодействия</b>	
3.1. Электромагнитное взаимодействие в атомах .....	62
3.2. Электромагнитная природа химической связи в молекулах, микро- и макротелах .....	66
3.3. Агрегатные превращения вещества.....	74
3.4. Идеальные и предельные состояния вещества .....	77
<b>Глава 4. Металлическое состояние вещества</b>	
4.1. Типы металлов.....	80
4.1.1. Металлы – химические элементы .....	81
4.1.2. Металлы – сплавы химических элементов.....	85
4.1.3. Металлы – химические соединения элементов .....	86
4.2. Кристаллические структуры металлов .....	86
4.3. Реальные кристаллы .....	90
4.4. Физические свойства металлов .....	93
<b>Раздел II. ФИЗИКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛАХ</b>	
<b>Глава 5. Температурные процессы в твёрдых металлах</b>	
5.1. Кристаллическая решётка металлов при нагреве ниже температуры плавления.....	97
5.2. Изменения в кристаллической решётке при плавлении .....	100
5.3. Изменение свойств металлов при плавлении .....	102
5.4. Модельные представления о процессах плавления.....	107
5.5. Состояние теории плавления реальных кристаллов .....	111
<b>Глава 6. Структура металлических расплавов</b>	
6.1. Экспериментальные исследования структуры металлических расплавов.....	113
6.2. Модельные представления о структуре металлических расплавов .....	117
6.2.1. Квазигазовые модели .....	117



	6.2.1.1. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса.....	118
	6.2.1.2. Модель жёстких сфер .....	118
	6.2.1.3. Структурная модель Дж. Бернала.....	120
	6.2.2. Квазикристаллические модели .....	122
	6.2.2.1. Модель свободного объёма.....	123
	6.2.2.2. Модель сиботаксисов.....	124
	6.2.2.3. Дырочная модель Френкеля.....	125
	6.2.2.4. Квазиполикристаллическая модель.....	127
	6.2.2.5. Квазихимическая модель.....	128
	6.2.2.6. Кластерная модель .....	129
	6.3. Изменение структурно-чувствительных свойств расплавов при перегреве и охлаждении.....	130
	6.3.1. Экспериментальные результаты.....	130
	6.3.2. Неравновесные состояния многокомпонентных расплавов.....	138
<b>Глава 7.</b>	<b>Кристаллизация металлических расплавов</b>	
	7.1. Зарождение и рост одиночных кристаллов .....	140
	7.1.1. Термодинамика гомогенного зарождения центров кристаллизации .....	140
	7.1.2. Рост сверхкритических зародышей.....	145
	7.1.3. Формирование габитуса кристаллов .....	146
	7.1.4. Гетерогенное зарождение кристаллических зародышей.....	148
	7.2. Кристаллизация расплавов при контакте с холодной стенкой .....	150
<b>Глава 8.</b>	<b>Отвердевание металлических расплавов без кристаллизации</b>	
	8.1. Кинетика кристаллизации и отвердевания .....	157
	8.2. Составы сплавов, склонных к аморфизации.....	161
	8.3. Практика получения аморфных и нанокристаллических металлов.....	165
<b>Раздел III.</b>	<b>ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ РУД</b>	
<b>Глава 9.</b>	<b>Атомно-молекулярные теории твёрдофазного восстановления</b>	
	9.1. Термодинамика углеродотермического восстановления .....	170
	9.2. Атомно-молекулярные представления о механизме твёрдофазного восстановления.....	173
	9.2.1. Механизм контактного взаимодействия .....	173
	9.2.2. Массоперенос при контактном взаимодействии.....	174
	9.3. Атомно-молекулярные модели двухстадийных реакций углеродотермического восстановления .....	179
	9.3.1. Газификация восстановителя.....	179
	9.3.2. Диссоциация оксидов .....	183
	9.3.3. Сублимация оксида.....	185
	9.4. Проблемы атомно-молекулярных теорий восстановления .....	187
<b>Глава 10.</b>	<b>Процессы в кристаллической решётке оксидов при нагреве и изменении парциального давления кислорода</b>	
	10.1. Структура и дефекты решётки кристаллических оксидов .....	192
	10.2. Диффузионная подвижность ионов в твёрдых оксидах .....	197
	10.3. Электропроводность твёрдых оксидов при изменении температуры и парциального давления кислорода.....	202
<b>Глава 11.</b>	<b>Связь электропроводности оксидов и восстановления металлов</b>	
	11.1. Особенности массо- и электропереноса в твёрдых оксидах, не учитываемые атомно-молекулярными теориями восстановления .....	211
	11.2. Материалы и методы экспериментального исследования электропроводности оксидов.....	213

	11.3. Изменение электрического сопротивления оксидов при нагреве в разных условиях .....	215
	11.4. Электрическая проводимость железосодержащих комплексных руд.....	218
	11.5. Связь температуры появления электропроводности, транскристаллической диффузии и начала твёрдофазного взаимодействия.....	222
<b>Глава 12.</b>	<b>Процессы в коллективных системах анионов и валентных электронов оксидов при восстановлении металлов</b>	
	12.1. Элементарные акты восстановления в конденсированных оксидах .....	224
	12.2. Распространение вакансий и «свободных» электронов в оксидах ...	228
	12.3. Термодинамические особенности образования металлических зародышей в оксидах .....	236
	12.4. Рост и формирование габитуса металлических кристаллов .....	238
	12.5. Восстановление многозарядных катионов, диссоциация оксидов и сублимация субоксидов.....	239
	12.5.1. Механизм диссоциации конденсированных оксидов .....	239
	12.5.2. Диссоциация и сублимация оксидов кремния .....	241
	12.5.3. Диссоциация и сублимация оксидов алюминия .....	246
<b>Глава 13.</b>	<b>Роль карбидов в процессах производства чугуна и углеродистых ферросплавов</b>	
	13.1. Существующие атомно-молекулярные представления о роли карбидов в процессах восстановления .....	251
	13.2. Результаты экспериментального исследования образования карбидов при восстановлении хрома.....	255
	13.3. Влияние силикатных фаз на образование карбидов и скорость восстановления хрома и железа в хромовых рудах.....	263
	13.4. Окислительный характер процессов образования карбидов.....	266
<b>Глава 14.</b>	<b>Электронно-вакансионная теория восстановления и её следствия для практики извлечения металлов из руд</b>	
	14.1. Состояние газов и оксидной фазы в восстановительных условиях с учётом электронного строения вещества.....	274
	14.2. Результаты экспериментальных исследований электронного и ионного обмена между твёрдыми реагентами химических реакций в условиях восстановления .....	277
	14.3. Условия твёрдофазного электронного и ионного обмена между углеродом и оксидами в восстановительных агрегатах .....	280
	14.4. Обобщение экспериментальных результатов углеродотермического восстановления металлов.....	284
	14.5. Следствия из электронно-вакансионной теории восстановления для практики извлечения металлов из руд .....	289
	<b>Библиографический список.....</b>	<b>298</b>