

В. Е. РОЩИН, А. В. РОЩИН

ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ



В. Е. РОЩИН
А. В. РОЩИН

ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ

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»,
а также при подготовке аспирантов, обучающихся
по направлению 22.06.01 «Технологии материалов»*

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК [669.187+669.14](075.8)

ББК 34.327

P58

Р е ц е н з е н т ы :

доктор технических наук, профессор *О. Ю. Шешуков*;
кафедра металлургии и химических технологий
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова»

Рошин, В. Е.

P58 Электрометаллургия и металлургия стали : учебник / В. Е. Рошин, А. В. Рошин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 576 с.

ISBN 978-5-9729-0630-7

Систематически изложены основы теории и практики производства стали в кислородных конвертерах, дуговых сталеплавильных печах и агрегатах специальной электрометаллургии. Описаны принципиальные конструктивные решения плавильных агрегатов.

Для студентов высших учебных заведений металлургических направлений подготовки, а также исследователей процессов в области сталеплавильного производства и практических работников металлургической и машиностроительной промышленности.

УДК [669.187+669.14](075.8)

ББК 34.327

ISBN 978-5-9729-0630-7

© В. Е. Рошин, А. В. Рошин, 2021

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	9
ЧАСТЬ I ПЕЧИ И АГРЕГАТЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Раздел I. Сталеплавильные агрегаты	
Глава 1. Структура сталеплавильного производства	
1.1. Появление и развитие сталеплавильного производства	11
1.2. Сырьё и продукция сталеплавильного производства	17
1.3. Структура сталеплавильного производства интегрированных заводов	20
1.4. Структура сталеплавильного производства минизаводов	23
1.5. Совмещённые технологии сталеплавильного производства	25
1.6. Производство стали и сплавов методами специальной электрометаллургии	28
Глава 2. Электрическая дуга как источник тепловой энергии в сталеплавильных агрегатах	
2.1. Общие сведения о дуговом разряде	32
2.2. Особенности дуги постоянного и переменного тока	36
2.3. Стабилизация, регулирование мощности и излучающей способности дуги	39
2.4. Горение дуги в вакууме	45
2.5. Особенности плазменной дуги	47
Глава 3. Кислородный конвертер	
3.1. Способы продувки металла кислородом	50
3.2. Общее устройство кислородного конвертера с верхней продувкой	52
3.3. Геометрия рабочего пространства	54
3.4. Футеровка	56
3.5. Опорное кольцо и опорные узлы	60
3.6. Кислородная фурма	62
3.7. Газоотводящий тракт	64
3.8. Особенности конструкции кислородных конвертеров с донной и комбинированной продувкой	66
Глава 4. Дуговые печи	
4.1. Развитие технологии и конструкции дуговых печей	69
4.2. Классификация дуговых печей	72
4.3. Геометрия рабочего пространства	75
4.4. Теплообмен в рабочем пространстве	78
4.5. Элементы конструкции	81
4.6. Системы улавливания и отвода печных газов	95
4.7. Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока	98
4.8. Двухванные агрегаты	101
Раздел II. Печи, плавильные установки и оборудование специального назначения	
Глава 5. Индукционные печи	
5.1. Общие сведения об индукционных печах	104
5.2. Основы электрической работы индукционной тигельной печи	106
5.3. Электрооборудование индукционных тигельных печей	110
5.4. Конструкция индукционных тигельных печей	114
Глава 6. Техника получения и измерения вакуума	
6.1. Использование вакуума в металлургии	118
6.2. Вакуумные насосы	118

	6.3. Приборы для измерения вакуума	124
	6.4. Вспомогательные элементы вакуумных систем	125
Глава 7.	Вакуумные индукционные печи	
	7.1. Классификация вакуумных индукционных печей	129
	7.2. Устройство и работа вакуумных индукционных печей полунепрерывного действия	130
Глава 8.	Вакуумные дуговые печи	
	1. Типы вакуумных дуговых печей	134
	2. Конструкция вакуумных дуговых печей	136
Глава 9.	Электронные плавильные установки	
	9.1. Принцип электронно-лучевого нагрева	142
	9.2. Типы электронно-лучевых установок	144
	9.3. Конструкция электронно-лучевых установок	147
Глава 10.	Плазменно-дуговые печи	
	10.1. Получение и применение плазменной дуги в сталеплавильных печах	152
	10.2. Плазменно-дуговые печи с керамическим тиглем	153
	10.3. Установки плазменно-дугового переплава в водоохлаждаемый кристаллизатор	154
Глава 11.	Установки электрошлакового переплава	
	11.1. Принцип электрошлакового переплава и возможные схемы его осуществления	156
	11.2. Конструкция установок ЭШП для получения слитков	157
	11.3. Установки ЭШП специального назначения	160
	11.4. Флюсоплавильные печи	163
ЧАСТЬ II.	ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ	
Раздел III.	Физические процессы при агрегации и агрегатных превращениях металлов	
Глава 12.	Общие сведения о металлах	
	12.1. Металлы – частный случай конденсированного состояния вещества	165
	12.2. Типы металлов	169
	12.2.1. Металлы – химические элементы	169
	12.2.2. Металлические сплавы химических элементов	172
	12.2.3. Металлы – химические соединения	173
	12.3. Металлическая связь – результат наличия вырожденного электронного газа	173
Глава 13.	Кристаллическое состояние металлов	
	13.1. Агрегатные состояния вещества	177
	13.2. Кристаллические структуры металлов	182
	13.3. Реальные кристаллы	185
Глава 14.	Изменения в кристаллической решётке при нагревании и плавлении металлов	
	14.1. Нагрев до температуры плавления	187
	14.2. Температура плавления	190
	14.3. Изменение свойств металлов при плавлении	192
	14.4. Модельные представления о плавлении металлов	197
	14.5. Состояние теории плавления реальных металлов	201
Глава 15.	Структура металлических расплавов	
	15.1. Экспериментальные исследования структуры металлических расплавов	203
	15.2. Модельные представления о структуре металлических расплавов	
	15.2.1. Квазигазовые модели	207

	15.2.2. Квазикристаллические модели	212
Глава 16.	Изменение структуры металлических расплавов при перегреве и охлаждении	
	16.1. Экспериментальные результаты измерения структурно-чувствительных свойств расплавов	219
	16.2. Неравновесное состояние многокомпонентных расплавов	226
Глава 17.	Кристаллизация металлических расплавов	
	17.1. Зарождение и рост одиночных кристаллов	229
	17.1.1. Термодинамика гомогенного зарождения центров кристаллизации	229
	17.1.2. Рост сверхкритических зародышей	233
	17.1.3. Формирование габитуса кристаллов	235
	17.1.4. Гетерогенное зарождение кристаллических зародышей	236
	17.2. Кристаллизация расплавов при контакте с холодной стенкой	239
Глава 18.	Отвердевание металлов без кристаллизации	
	18.1. Кинетика кристаллизации и отвердевания	245
	18.2. Составы сплавов, способных отвердевать без кристаллизации	248
Раздел IV.	Физико-химические взаимодействия в расплавах	
Глава 19.	Свойства жидких сплавов железа	
	19.1. Форма существования элементов в расплавах железа	253
	19.2. Физические свойства расплавов железа	255
	19.3. Химическая активность примесей в жидком железе	258
Глава 20.	Шлаки сталеплавильных процессов	
	20.1. Состав шлаков и основные диаграммы состояния шлаковых систем .	263
	20.2. Строение расплавленных шлаков	268
	20.3. Определение активностей компонентов шлака	272
	20.4. Химические свойства шлаков	275
	20.5. Физические свойства шлаков	277
Глава 21.	Окислительные процессы в сталеплавильной ванне	
	21.1. Окислительные условия выплавки стали	280
	21.2. Окисление углерода	282
	21.3. Удаление фосфора	288
	21.4. Окисление и восстановление кремния	291
	21.5. Окисление и восстановление марганца	292
	21.6. Окисление и восстановление хрома	293
	21.7. Окисление вольфрама	294
Глава 22.	Десульфурация металла	
	22.1. Влияние серы на свойства стали	295
	22.2. Распределение серы между металлом и шлаком	297
	22.3. Взаимодействие серы с примесями в металле	301
Глава 23.	Раскисление стали	
	23.1. Цель и методы раскисления	303
	23.2. Взаимодействие раскислителей с кислородом	303
	23.3. Образование продуктов раскисления	312
	23.4. Удаление продуктов раскисления	319
	23.5. Диффузионное раскисление шлаком	322
	23.6. Оксидные неметаллические включения в стали	323
Глава 24.	Газы в стали	
	24.1. Водород в стали	326
	24.2. Азот в стали	329
Глава 25.	Рафинирование стали в вакууме	332

	25.1. Раскисление в вакууме	333
	25.2. Удаление неметаллических включений	334
	25.3. Процессы дегазации и удаления цветных металлов	336
	25.4. Взаимодействие металлургического расплава с футеровкой	340
Часть III.	ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ	
Раздел V.	Технология плавки в плавильных агрегатах	
Глава 26.	Шихтовые материалы	342
	26.1. Металлоносители	342
	26.1.1. Амортизационный пакетированный лом	343
	26.1.2. Чугун	343
	26.1.3. Стальной лом	344
	26.1.4. Губчатое железо и синтетические шихтовые материалы	347
	26.2. Добавочные материалы	
	26.2.1. Раскисляющие и легирующие материалы	349
	26.2.2. Шлакообразующие материалы	350
	26.2.3. Окислители	351
	26.2.4. Науглероживатели	352
Глава 27.	Общие положения технологии	
	27.1. Технологический цикл плавки стали в кислородных конвертерах	352
	27.2. Технологический цикл плавки стали в дуговых сталеплавильных печах	354
	27.2.1. Плавка на свежей шихте	355
	27.2.2. Переплавление легированных отходов	357
Глава 28.	Технология окислительных процессов	
	28.1. Аэродинамика кислородной струи	359
	28.2. Взаимодействие кислородной струи с металлом	362
	28.3. Особенности технологии окислительных процессов в конвертерах и дуговых печах	365
	28.4. Дутьевой режим	367
	28.5. Использование потенциального химического тепла CO	367
	28.6. Продувка порошками в дуговых печах	369
Глава 29.	Процессы и химические реакции в первичной реакционной зоне	
	29.1. Механизм окислительных процессов	371
	29.2. Окисление углерода	374
	29.3. Окисление кремния	375
	29.4. Окисление марганца	375
Глава 30.	Шлакообразование и рафинирование металла шлаком	
	30.1. Растворение шлакообразующих и формирование шлака	376
	30.2. Шлакообразование в кислородном конвертере	378
	30.3 Шлакообразование в ДСП	379
	30.4. Рафинирование металла шлаком	381
	30.4.1. Дефосфорация стали	383
	30.4.2. Десульфурация стали	385
Глава 31.	Интенсификация тепло- и массопереноса в сталеплавильной ванне	
	31.1. Продувка газом снизу. Общие вопросы	387
	31.2. Продувка металлической ванны снизу в конвертере	388
	31.3. Продувка металлической ванны снизу в дуговой печи	391
Глава 32.	Интенсификация плавления лома в дуговых печах	
	32.1. Оптимизация энерготехнологического режима	393
	32.2. Применение жидкого чугуна	395
	32.3. Использование топливно-кислородных горелок	397
	32.4. Предварительный подогрев лома	400

	32.4.1. Подогрев металлолома вне плавильного агрегата	400
	32.4.2. Подогрев металлолома в системах подачи шихты	402
	32.4.3. Интегрированные с ДСП установки подогрева шихты	405
	32.4.4. Экологические проблемы подогрева лома	407
	32.4.5. Перспективный комбинированный процесс подогрева лома в шахтном подогревателе	410
	32.4.6. Процесс выплавки стали из лома с использованием преимущественно первичной энергии топлива	412
Глава 33.	Плавка стали с применением металлизированного сырья	
	33.1. Особенности применения металлизированного сырья	413
	33.2. Технология плавки металлизированного сырья в дуговой печи	415
Раздел VI.	Внепечная обработка и разливка стали	
Глава 34.	Подготовка расплава к разливке	
	34.1. Внепечная обработка стали	417
	34.2. Агрегаты и оборудование для внепечной обработки стали	418
	34.2.1. Сталеразливочный ковш	420
	34.2.2. Агрегаты доводки стали	422
	34.2.3. Агрегат «ковш-печь»	427
	34.2.4. Циркуляционный вакууматор РН	429
	34.2.5. Камерный вакууматор	431
	34.2.6. Обработка расплава в промежуточном ковше МНЛЗ	432
	34.2.7. Микролегирование и модифицирование в кристаллизаторе МНЛЗ и в изложнице	433
	34.3. Комплексное использование агрегатов внепечной обработки стали .	434
Глава 35.	Разливка стали в изложницы	
	35.1. Влияние окисленности стали на способ отливки слитков	436
	35.2. Изложницы	437
	35.3. Способы разливки стали в изложницы	439
	35.4. Строение и структура слитка спокойной стали	440
	35.5. Усадка и усадочные дефекты слитка спокойной стали	441
	35.6. Структурные зоны слитка спокойной стали	449
	35.7. Способы воздействия на формирование структуры слитка спокойной стали	452
	35.8. Ликвационные процессы и зоны сегрегации слитка спокойной стали	454
	35.9. Строение слитка кипящей стали	459
Глава 36.	Агрегаты для непрерывной разливки стали	
	36.1. Типы машин непрерывного литья заготовок	461
	36.2. Устройство и работа машин непрерывного литья заготовок	466
Глава 37.	Технология непрерывной разливки и качество заготовки	
	37.1. Технология разливки	476
	37.2. Дефекты непрерывнолитых заготовок	478
	37.2.1. Дефекты профиля	478
	37.2.2. Дефекты поверхности	481
	37.2.3. Дефекты внутренней структуры	486
	37.3. Методы внешних воздействий на металл в процессе кристаллизации	493
Глава 38.	Совмещение литья и прокатки	
	38.1. Способы повышения эффективности литья заготовок	503
	38.2. Литейно-прокатные агрегаты	504
	38.3. Листовые литейно-прокатные агрегаты	506
	38.4. Зона совмещения линии разливки и прокатки	510

	38.5. Развитие агрегатов для производства стальной полосы	512
Глава 39.	Бесслитковое производство тонкой полосы	
	39.1. Литьё полосы на двухвалковых машинах	516
	39.2. Получение аморфной и нанокристаллической ленты на одновалковых машинах	520
Раздел VII.	Технологии производства стали специального назначения	
Глава 40.	Сталь с ультранизким содержанием углерода	
	40.1. Новый класс стали с ультранизким содержанием углерода	523
	40.2. Технология производства	524
Глава 41.	Нержавеющая сталь	
	41.1. Характеристика стали и физико-химические условия её производства	526
	41.2. Аргано-кислородное рафинирование	528
	41.3. Производство нержавеющей стали в конвертерах	531
	41.4. Окислительное циркуляционное вакуумирование	532
	41.5. Нержавеющая сталь с ультранизким содержанием углерода	534
Глава 42.	Сталь для холоднокатаного листа	
	42.1. Выбор способа производства	536
	42.2. Технология производства	537
Глава 43.	Высокоуглеродистая сталь	539
	43.1. Рельсовая сталь	540
	43.2. Подшипниковая сталь	542
	43.3. Быстрорежущая сталь	544
Глава 44.	Электротехническая сталь	
	44.1. Характеристика стали и требования к её производству	546
	44.2. Технология производства	547
Глава 45.	Рафинирование металла методами спецэлектromеталлургии	
	45.1. Задачи спецэлектromеталлургии и способы их решения	548
	45.2. Технологические возможности получения металла высокого качества в первичных агрегатах	549
	45.3. Общие закономерности рафинирования металла в агрегатах вторичного переплава	550
	45.4. Условия рафинирования металла вакуумом, газом или шлаком при переплавных процессах	554
Глава 46.	Особенности выплавки стали и сплавов в первичных агрегатах спецэлек- тromеталлургии	
	46.1. Технология плавки в открытых индукционных печах	556
	46.2. Технология плавки в вакуумных индукционных печах	558
	46.3. Технология плавки в плазменно-дуговых печах с керамическим тиглем	561
Глава 47.	Основы технологии рафинирующих переплавов	
	47.1. Производство и подготовка расходных электродов и заготовок ...	562
	47.2. Флюсы для ЭШП и их подготовка	564
	47.3. Технология вакуумно-дугового переплава	565
	47.4. Технология плазменно-дугового переплава	567
	47.5. Технология электрошлакового переплава	567
	47.6. Сравнение эффективности рафинирующих переплавов	569
	47.7. Библиографический список.....	571