

В.С. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, Б.И. ЮДИН

ВАКУУМНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

НОВОСИБИРСК
2011

УДК 621.365.2-982
Ч-462

Рецензенты:
Отделение «Электротехнология»
Академии электротехнических наук РФ;
А.С. Аньшаков, д-р техн. наук, проф. ИТ СО РАН;
А.М. Кручинин, д-р техн. наук, проф. МЭИ

Чередниченко В.С.

Ч-462 Вакуумные плазменные электропечи: монография / В.С. Чередниченко, Б.И. Юдин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 586с.: ил 40 цв. ил. – (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1558-0

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, расчеты, опыт конструирования и эксплуатации вакуумных плазменных электропечей, предназначенных для переплава и восстановления металлов, сфероидизации и получения чешуйчатых порошков, высокоионизированных потоков плазмы и паров различных веществ. Рассмотрены принципы работы вакуумных плазмотронов с горячими полыми катодами, их конструктивные решения, даны рекомендации по расчету плазмотронов, системы их газоснабжения и электропитания. Представлены результаты промышленной реализации вакуумных плазменных электропечей и установок.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занятых созданием и эксплуатацией плазменных электропечей и систем их питания, преподавателей, студентов, магистрантов и аспирантов различных специальностей.

УДК 621.365.2-982

ISBN 978-5-7782-1558-0

© Чередниченко В.С., Юдин Б.И. 2011
© Новосибирский государственный
технический университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение.....	11
Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ В ВАКУУМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ.....	21
§ 1.1. Газовые разряды в постоянном электрическом поле.....	21
§ 1.2. Рабочее давление в вакуумных плазменных электропечах....	24
1.2.1. Понятие о вакууме и давлении.....	24
1.2.2. Классификация вакуума по диапазонам давления	30
1.2.3. Теплофизические свойства газов при изменении давле- ния и температуры.....	39
§ 1.3. Режимы течения газа в вакуумных электропечах	44
Глава 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМНЫХ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ.....	49
§ 2.1. Основные параметры плазмы.....	50
§ 2.2. Экранирование зарядов в плазме.....	56
§ 2.3. Равновесная и неравновесная плазма.....	60
§ 2.4. Процессы в полностью ионизированной плазме.....	63
Глава 3. КОНСТРУКЦИИ ПЛАЗМОТРОНОВ ВАКУУМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ.....	69
§ 3.1. Вакуумные плазмотроны с полыми катодами.....	70
§ 3.2. Классификация вакуумных плазмотронов с горячим полым катодом	94
Глава 4. ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПЛАЗМОТРОНАХ С ПОЛЫМИ КАТОДАМИ	97
§ 4.1. Постановка задачи.....	97
§ 4.2. Вакуумный разряд с полым катодом в диапазоне режимов тлеющего разряда.....	105
4.2.1. Зажигание газового разряда. Таунсендовский разряд.....	105
4.2.2. Напряжение зажигания газового разряда. Закон Пашена	112

4.2.3. Вольт-амперные характеристики разряда с полым катодом в диапазоне режимов тлеющего разряда	124
4.2.4. Пусковые режимы вакуумных плазмотронов с полым катодом.....	132
§ 4.3. Вакуумный разряд с полым катодом в диапазоне режимов дуговых разрядов	143
4.3.1. Диффузная и контрагированная формы разрядов	143
4.3.2. Вольт-амперная характеристика разрядов с горячим полым катодом.....	147
4.3.3. Вольт-температурная характеристика прикатодной области разряда	150
§ 4.4. Обобщенные характеристики вакуумных разрядов с полыми катодами.....	157
4.4.1. Критерии подобия разрядов с полыми катодами с осевой подачей газа	157
4.4.2. Экспериментальные характеристики вакуумных разрядов с полыми катодами.....	164
4.4.3. Рабочие параметры вакуумных плазмотронов с полыми катодами.....	175
§ 4.5. Электрические цепи с вакуумными разрядами	177
4.5.1. Вольт-амперные характеристики системы источник питания – газовый разряд	181
4.5.2. Зависимость характеристик разряда с полым катодом от параметров источников питания	
Глава 5. ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПУСКОВЫХ И РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ПРОТОЧНОГО ПОЛОГО КАТОДА ВАКУУМНОГО ПЛАЗМОТРОНА.....	198
§ 5.1. Постановка задачи.....	198
§ 5.2. Газодинамические процессы в газоподводящей трубке.....	200
§ 5.3. Газодинамические процессы в полости цилиндрического катода	212
§ 5.4. Газодинамические процессы в столбе разряда.....	223
Глава 6. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ	232
§ 6.1. Постановка задачи.....	232
§ 6.2. Взаимодействие плазмы с электромагнитным полем газового разряда.....	236
§ 6.3. Магнитогазодинамические потоки плазмы в полости катодов	244
§ 6.4. Энергетическое взаимодействие плазмы с поверхностью полого катода	250

§ 6.5. Экспериментальные исследования параметров плазмы в полости катода и столбе разряда	255
§ 6.6. Электрическое поле в полости катода.....	263
§ 6.7. Анодная область. Баланс энергии на аноде	274
§ 6.8. Модель течения плазмы в полости катодов вакуумных плазмотронов.....	282
Глава 7. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛЫХ КАТОДАХ ВАКУУМНЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ	297
§ 7.1. Формирование плазмы внутри полости катода.....	297
§ 7.2. Постановка задачи экспериментальных исследований	302
§ 7.3. Математическая модель тепловых процессов в полом катоде	305
§ 7.4. Экспериментальное исследование процессов энергообмена и тепловых полей в полых катодах	309
§ 7.5. Температурное поле на внутренней поверхности полого катода.....	314
§ 7.6. Тепловой критерий диффузного взаимодействия плазмы с поверхностью катода	321
§ 7.7. Параметры зоны взаимодействия плазмы с поверхностью катода	326
§ 7.8. Влияние эмиссионных процессов, свойств материала, толщины стенки катода и расхода газа на температурное поле катода	331
7.8.1. Роль плазмообразующего газа при формировании процессов в полости катода.....	332
7.8.2. Зависимость характеристик вакуумных плазмотронов от свойств материала катодов и плазмообразующего газа ...	336
7.8.3. Влияние на температурное поле толщины стенки катода	339
7.8.4. Влияние термоавтоэмиссионных процессов на формирование устойчивых рабочих режимов катодов.....	346
7.8.5. Влияние свойств плазмообразующих газов на режимы работы вакуумных плазмотронов с полыми катодами	351
7.8.6. Влияние расхода плазмообразующего газа на температурное поле катодов	353
§ 7.9. Электроперенос и теплообмен на внутренней поверхности полого катода	356
7.9.1. Электро- и теплбаланс прикатодной области разряда с полым катодом.....	358
7.9.2. Функции распределения заряженных частиц в неравновесной плазме	367
7.9.3. Практические примеры решения кинетических уравнений плазмы.....	382

7.9.4. Решение кинетической задачи двухслойной модели при- катодной области.....	396
7.9.5. Анализ результатов расчета теплоэлектробаланса в при- катодной области.....	399
§ 7.10. Сопряженные параметры квазинейтральной плазмы и пе- реходного слоя прикатодной области разряда.....	403
7.10.1. Постановка краевой кинетической задачи.....	405
7.10.2. Численные исследования электростатического слоя.....	408
7.10.3. Функции распределения частиц в переходном слое плазма–стенка катода.....	411
7.10.4. Исследование переходного слоя.....	413
7.10.5. Анализ полученных результатов.....	415
Глава 8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОРОШКОВЫМ МАТЕРИАЛОМ.....	418
§ 8.1. Особенности обработки порошковых материалов в столбе вакуумного разряда с полым катодом.....	418
§ 8.2. Постановка задачи математического моделирования нагре- ва порошка в неравновесной плазме.....	420
§ 8.3. Нагрев порошковых материалов в сильноточных вакуум- ных разрядах.....	424
§ 8.4. Математическая модель взаимодействия плазмы со сфери- ческим телом.....	432
§ 8.5. Нагрев частицы порошка в неравновесной плазме.....	437
§ 8.6. Энергетический баланс нагрева мелкодисперсного порошка	455
Глава 9. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ.....	463
§ 9.1. Вакуумные плазмотроны с полыми катодами для нагрева порошковых материалов.....	463
§ 9.2. Ток утечки и параметры устройств для создания стабилизи- рующего магнитного поля.....	466
§ 9.3. Интенсивность нагрева и коэффициент сосредоточенности выделения энергии на аноде при выплавке слитков в кри- сталлизаторе.....	476
§ 9.4. Удельная мощность нагрева расплава в кристаллизаторе.....	482
§ 9.5. Энергетический баланс вакуумной плазменной электропечи при обработке порошковых материалов с получением агло- мерата.....	485
§ 9.6. Конструктивные особенности вакуумных плазменных пе- чей для рафинирования и деформации порошков.....	490

§ 9.7. Движение порошка в технологической трубке совместно с газом	492
§ 9.8. Движение частицы порошка при выходе из технологической трубки в столб разряда	499
§ 9.9. Влияние испарительных процессов на параметры плазменных потоков в столбе разряда	506
§ 9.10. Электромагнитное взаимодействие порошка с внешним магнитным полем	507
§ 9.11. Электромагнитное взаимодействие частиц порошка с магнитным полем столба разряда	510
§ 9.12. Специальные режимы работы вакуумных плазмотронов	512
§ 9.13. Технология получения рафинированных и деформированных порошков	513
§ 9.14. Экспериментальное изучение движения дисперсной фазы в потоке плазмы	519
§ 9.15. Нагрев дисперсных материалов в плазменном потоке столба разряда для оплавления и деформации частиц порошка	523
Глава 10. КОНСТРУКЦИИ И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПЕЧЕЙ	527
§ 10.1. Особенности нагрева и переплава металлов в вакуумных плазменных печах	527
§ 10.2. Вакуумные плазменные печи для выплавки слитков	530
§ 10.3. Вакуумные плазменные печи для получения порошков различных металлов	542
§ 10.4. Специальные области использования вакуумных плазменных электропечей	548
Заключение	557
Библиографический список	559