

УДК 533.9
ББК 30.3:31.29

Электрические разряды постоянного и высокочастотного тока с проточными и непроточными электролитическими электродами в процессах модификации материалов и изделий при пониженных давлениях : монография / Ал. Ф. Гайсин, И. Ш. Абдуллин; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. – 188 с.

ISBN 978-5-7882-1582-2

В монографии систематизированы и обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований электрических разрядов постоянного и высокочастотного тока со струйными электролитическими электродами в процессах модификации материалов и изделий при пониженных давлениях. Рассмотрены особенности электрического пробоя вдоль струйного электролитического катода, формы многоканального разряда и аномального тлеющего разряда между струйным, капельным и пористым электролитическим катодом и твердым анодом, а также между струйным электролитическим анодом и струйным электролитическим катодом. Особое внимание уделено изучению механизма горения многоканального разряда при пониженных давлениях и разработке на его основе новых технологий модификации поверхности материалов и изделий.

Впервые представлены результаты экспериментального исследования высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) между электролитическим и металлическим электродами со струей электролита в широком диапазоне давления. Приведена математическая модель высокочастотной плазменной обработки твердых тел при пониженном давлении.

Предназначена для широкого круга научных работников и специалистов, занимающихся вопросами физики и техники низкотемпературной плазмы, преподавателей, инженеров-технологов, аспирантов, магистров и бакалавров вузов.

Рецензенты: д-р. техн. наук, проф. *В.В. Кудинов*
(Институт материаловедения и металлургии
им. А.А. Байкова);
д-р. техн. наук, проф. *Р.Р. Зиганшин*
(зам. ген. директора по научно-техническому развитию
ОАО «Вакууммаш»)

ISBN 978-5-7882-1582-2

© Гайсин Ал. Ф., Абдуллин И. Ш., 2013

© Казанский национальный исследовательский
технологический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗЕ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДАМИ.....	8
1.1. Зажигание электрического разряда между твердым и электролитическим электродами	8
1.2. Особенности горения электрического разряда между электролитическим катодом и твердым анодом	10
1.3. Некоторые особенности электрического разряда между электролитическим анодом и твердым катодом	25
1.4. Электрический разряд между струйным электролитическим и твердым электродами	27
1.5. Практическое применение электрического разряда между электролитическим и твердым электродами ...	31
Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ	46
2.1. Функциональная схема экспериментальной плазменной установки, работающей при пониженных давлениях	46
2.2. Высоковольтная экспериментальная установка (выходное напряжение до 4000 В при токе 10 А)	49
2.3. Высоковольтная экспериментальная установка (выходное напряжение 1500 В при токе 2 А)	52
2.4. Вакуумная система экспериментальной установки ...	52
2.5. Разрядная камера с электролитической ванной	56
2.6. Устройство для получения электрического разряда между струйным (капельным) электролитическим катодом и твердым анодом при пониженных давлениях	58
2.7. Экспериментальная установка для исследования высокочастотного ($f = 13,56$ МГц) емкостного разряда (ВЧЕР) между электролитическим и металлическим электродами	59

- 2.8. Измерительная аппаратура и методика проведения экспериментов, оценка точности измерений 61

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ СТРУЙНЫМ (КАПЕЛЬНЫМ) ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ КАТОДОМ И ТВЕРДЫМ АНОДОМ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ..	64
3.1. Особенности электрического пробоя вдоль струйного электролитического катода при пониженных давлениях	64
3.2. Формы МР и АТР между струйным электролитическим катодом и твердым анодом	68
3.3. Вольт-амперные характеристики аномального тлеющего разряда между струйным электролитическим катодом (растворы NaCl, NaHCO ₃ , NH ₄ Cl в технической воде) и твердым анодом (медь М1, сталь Х18Н9Т, алюминий АМЦ40, эбонит)	72
3.3.1. ВАХ аномального тлеющего разряда между струйным электролитическим катодом из хлорида натрия (NaCl) в технической воде и медным анодом	72
3.3.2. ВАХ аномального тлеющего разряда между струйным электролитическим катодом из гидрокарбоната натрия (NaHCO ₃) в технической воде и медным анодом	74
3.3.3. ВАХ аномального тлеющего разряда между струйным электролитическим катодом из хлористого аммония (NH ₄ Cl) в технической воде и медным анодом	76
3.3.4. ВАХ аномального тлеющего разряда между струйным электролитическим катодом из хлорида натрия (NaCl) и анодом из эбонита	78
3.4. Формы и характеристики аномального тлеющего разряда между капельным электролитическим катодом и медным анодом	79

3.5. Распределение потенциала и напряженности электрического поля вдоль струйного электролитического катода	80
3.6. Распределения значения плотности вероятности тока АТР	82
3.7. Колебания тока электрического разряда между струйным электролитическим катодом и медным анодом	83
3.8. Локальная, струйная, одновременная очистка и полировка поверхности меди М1 и стали Х18Н9Т	86
3.9. Локальное, струйное повышение твердости на поверхности (медь М1 и алюминий АМЦ40)	88
3.10. Уравнение регрессии для нахождения оптимальных режимов локальной, струйной очистки с одновременной полировкой поверхности меди	89

Глава 4. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ АНОДОМ И ПОРИСТЫМ КАТОДОМ.....	94
4.1. Формы электрического разряда между струйным электролитическим анодом и катодом (твердый, пористый)	94
4.2. Развитие электрического разряда между капельным электролитическим анодом и пористым катодом	101
4.3. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда между струйным электролитическим анодом (твердый, пористый и струйный) и катодом	103
4.4. Гистограммы распределения значения напряжения и тока разряда	103
4.5. Устройство для получения электрического разряда между струйным электролитическим анодом и пористым катодом	104
4.6. Очистка поверхности меди тлеющим разрядом между струйным электролитическим анодом и пористым катодом	106

Глава 5.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ КАТОДОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ, ПОГРУЖЕННЫМ В ЭЛЕКТРОЛИТ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ	108
5.1.	Аномальный тлеющий разряд с металлическим анодом, погруженным в электролитический катод с турбулентным перемешиванием	108
5.1.1.	Формы аномального тлеющего разряда в электролитическом катоде с турбулентным перемешиванием	109
5.1.2.	Вольт-амперные характеристики аномального тлеющего разряда в электролите с турбулентным перемешиванием ...	111
5.2.	Механизм очистки и полировки поверхности металлического анода	112
Глава 6.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ ПРОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ АНОДОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ КАТОДОМ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ	116
6.1.	Переход аномального тлеющего разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом в многоканальный разряд	116
6.2.	Вольт-амперные характеристики разряда и падение напряжения в электролитическом аноде	117
6.3.	Распределение потенциала и напряженности электрического поля для электрических разрядов (АТР и МР) между электролитическим анодом и металлическим катодом	120
6.4.	Колебания тока электрического разряда	121
6.5.	Обобщение экспериментальных данных с использованием методов теории подобия и размерности	122
Глава 7.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА СО СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ	126

7.1. Формы и плотности тока электрического ВЧЕ-разряда между электролитическим и металлическим электродами напряжения	126
7.2. Особенности высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) со струйным электролитическим электродом	128
7.3. Некоторые особенности развития высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) между капельно-струйным электролитическим электродом и проточной электролитической ячейкой	133
7.4. Высокочастотный емкостной разряд (ВЧЕР) при пониженных давлениях с металлическим электродом, погруженным в электролит	138
Глава 8. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ	144
8.1. Математическая модель квазинейтральной ВЧ-плазмы пониженного давления	149
8.1.1. Система краевых задач	149
8.1.2. Необходимые условия разрешимости системы краевых задач	155
8.2. Математическая модель слоя положительного заряда возле обрабатываемого тела	161
8.2.1. Структура СПЗ у поверхности обрабатываемого тела	161
8.2.2. Система задач «предслоя»	164
8.2.3. Система задач двойного слоя и СПЗ	167
8.3. Обсуждение модели	169
8.4. Результаты теоретических исследований	170
8.4.1. Постановка задачи численного экспериментирования	170
8.4.2. Концентрация электронов	172
8.4.3. Напряженность магнитного поля	173
8.4.4. Напряженность электрического поля	174
8.4.5. Температура плазменной струи	175
Заключение	181