

Ю. Д. Гамбург
Дж. Зангари

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Перевод с английского
доктора химических наук, профессора
Ю. Д. Гамбурга

2-Е ИЗДАНИЕ, ЭЛЕКТРОННОЕ



Москва
Лаборатория знаний
2020

УДК 541.124/128+621.793+669.017

ББК 34.663

Г18

Гамбург Ю. Д.

Г18 Теория и практика электроосаждения металлов / Ю. Д. Гамбург, Дж. Зангари ; пер. с англ. — 2-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 441 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-809-4

Учебно-справочное пособие, содержащее сведения о важнейших проблемах электрохимии металлов и актуальных вопросах практической гальванотехники. Рассмотрены современное состояние теории электродных процессов, нуклеации и роста кристаллов, образования сплавов и включения примесей, влияния блескообразующих и выравнивающих добавок, вопросы распределения тока по поверхности, преимущества и недостатки разнообразных видов покрытий из металлов и сплавов, приведена рецептура современных электролитов. Читатель найдет детальные сведения о способах приготовления растворов, режимах работы, особенностях эксплуатации гальванических ванн, новых технологических процессах, а также о роли основных компонентов, примесей и добавок, методах контроля физических свойств и структуры гальванопокрытий.

Для студентов, аспирантов, исследователей в области электрохимии и физикохимии, разработчиков новых материалов и технологов в электрохимии, машиностроении, приборостроении и электронике.

УДК 541.124/128+621.793+669.017

ББК 34.663

Деривативное издание на основе печатного аналога: Теория и практика электроосаждения металлов / Ю. Д. Гамбург, Дж. Зангари ; пер. с англ. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 438 с. : ил. — ISBN 978-5-9963-0515-5.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

Translation from English language edition:

Theory and Practice of Metal Electrodeposition

by Yuliy D. Gamburg and Giovanni Zangari

Copyright © 2011 Springer New York
Springer New York is a part
of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

ISBN 978-5-00101-809-4

© Лаборатория знаний, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Предисловие к русскому изданию	7
Глава 1. Введение в электроосаждение. Важнейшие термины и представления	9
1.1. Электроосаждение металлов	9
1.2. Примеры электрокристаллизации	10
1.3. Электродные процессы. Закон Фарадея	11
1.4. Плотность тока	12
1.5. Электроды и электродный потенциал	14
1.6. Равновесный потенциал и перенапряжение	17
1.7. Смешанный потенциал	19
1.8. Зависимости плотности тока от потенциала (вольтамперограммы, или поляризационные кривые)	19
1.9. Выход по току	22
1.10. Стадии электродных процессов. Быстрые и медленные стадии	24
1.11. Электролиты для осаждения металлов	26
1.12. Влияние параметров осаждения на ход процесса выделения металла	28
1.13. Электрическая проводимость растворов	30
1.14. Состав, структура и свойства осадков	32
1.15. Распределение тока и металла	36
1.16. Анодные процессы	37
Литература	38
Глава 2. Структура границы металл–раствор	39
2.1. Введение. Пространственное разделение электрических зарядов	39
2.2. Плотная часть двойного слоя (слой Гельмгольца)	42
2.3. Диффузный слой (слой Гуи–Чапмена)	44
2.4. Адсорбция на электродах	49
2.5. Специфическая адсорбция	56
2.6. Адсорбция незаряженных органических молекул	59
2.7. Двойной слой на поликристаллической поверхности	61
2.8. Некоторые расчеты параметров двойного слоя	63
Литература	66
Глава 3. Электрохимическая термодинамика и электрохимическая кинетика	67
3.1. Электрохимический потенциал	67
3.2. Равновесие на границе раздела металл–электролит	68

3.3. Электродный потенциал. Уравнение Нернста	68
3.4. Измерения электродного потенциала	70
3.5. Теория переноса заряда	72
3.6. Плотность тока обмена. Перенапряжение. Поляризационные кривые	76
3.7. Многостадийные электрохимические процессы	81
3.8. Химические стадии	84
3.9. Кинетика разряда ионов в присутствии поверхностно-активных веществ	86
3.10. Особенности разряда комплексов	88
Литература	91
Глава 4. Влияние диффузии на скорость электрохимических процессов	92
4.1. Перенос ионов и ток	92
4.2. Диффузия	95
4.3. Предельный ток	97
4.4. Диффузионное перенапряжение	99
4.5. Смешанная кинетика	101
4.6. Влияние электрического поля на предельный ток	103
4.7. Роль диффузии в разряде комплексных частиц	106
4.8. Диффузионный слой на вращающемся дисковом электроде	107
Литература	112
Глава 5. Термодинамика и кинетика нуклеации	113
5.1. Введение	113
5.2. Гомогенная нуклеация	114
5.3. Гетерогенная нуклеация	116
5.4. Механизмы нуклеации	119
5.5. Особенности электрокристаллизации	120
5.6. Функция распределения зародышей по размерам	122
5.7. Кинетика стационарной нуклеации	123
5.8. Нестационарная нуклеация	127
5.9. Экспериментальные методы	129
5.10. Кинетика массовой кристаллизации	130
5.11. Рост индивидуального полусферического кластера при смешанной кинетике	133
5.12. Нуклеация и рост с перекрытием	135
Литература	140
Глава 6. Морфология растущей поверхности металла	141
6.1. Ступени и изломы	141
6.2. Адаптомы и ад-ионы	143
6.3. Нормальный рост и слоевой рост	144
6.4. Скорость нормального роста	145
6.5. Скорость перемещения ступени при слоевом росте	146
6.6. Распределение скорости нуклеации между ступенями роста	149
6.7. Влияние адсорбции на скорость кристаллизации	151
6.8. Омическое падение напряжения у растущей ступени	152
6.9. Размер зерен осадка как функция перенапряжения	153
6.10. Морфология поверхности компактных электролитических осадков	155

6.11. Кристаллическая (нерегулярная) шероховатость	160
Литература	161
Глава 7. Распределение потенциала в объеме электролита и распределение тока по поверхности электрода	162
7.1. Постановка задачи	162
7.2. Первичное, вторичное и предельное распределение поля. Поле поляризации	163
7.3. Основные принципы расчета электрических полей в электролизерах	169
7.4. Типичные примеры первичного и вторичного распределения тока	171
7.5. Рассеивающая способность электролитов и поляризуемость электродов. Стандартное определение рассеивающей способности	179
7.6. Рассеивающая способность и катодная поляризация. Методы улучшения рассеивающей способности	183
7.7. Распределение тока на микроструктурированных и наноструктурированных электродах: осаждение через маску ...	186
Литература	189
Глава 8. Распределение тока по шероховатой поверхности	190
8.1. Введение	190
8.2. Коэффициент распределения тока и основная задача теории микрораспределения	192
8.3. Геометрическое выравнивание	193
8.4. Эволюция микропрофиля в результате неравномерного первичного распределения тока	195
8.5. Изменение шероховатости поверхности при вторичном и третичном микрораспределении тока	199
8.6. Истинное выравнивание	202
8.7. Устойчивость фронта роста при электрокристаллизации ...	206
8.8. Блестящие гальванопокрытия	209
Литература	210
Глава 9. Нестационарные процессы электроосаждения и электрохимические методы	211
9.1. Нестационарная диффузия	211
9.2. Включение–выключение тока или перенапряжения	213
9.3. Наложение синусоидального тока	216
9.4. Стационарный и пульсирующий диффузионные слои	218
9.5. Прямоугольные импульсы	219
9.6. Роль паузы тока или анодного периода	222
9.7. Распределение тока, выход по току и включение примесей при нестационарных процессах	222
9.8. Линейная развертка тока и потенциала; оптимальная скорость съёмки поляризационных кривых	225
Литература	227
Глава 10. Электроосаждение сплавов	228
10.1. Введение	228
10.2. Области применения электроосажденных сплавов	228

10.3. Парциальные поляризационные кривые для компонентов сплава	229
10.4. Условия сплавообразования	233
10.5. Типы структуры электролитически осажденных сплавов ...	237
10.6. Фазовые диаграммы сплавов	241
10.7. Сплавы типа механической смеси (эвтектического типа) ...	243
10.8. Сплавы типа твердых растворов	245
10.9. Интерметаллические соединения и аморфные сплавы	248
10.10. Равновесные и стационарные потенциалы сплавов	249
10.11. Учет энергии сплавообразования при вычислениях потенциала осаждения сплава	251
10.12. Нуклеация и рост металлических кластеров на инородной подложке при электроосаждении сплавов типа механической смеси	254
10.13. Влияние различных факторов на состав сплава	255
10.14. Электроосаждение мультислойных и поверхностных сплавов	257
Литература	261
Глава 11. Соосаждение примесей	262
11.1. Источники примесей в осадках	262
11.2. Предпосылки теоретического анализа кинетики соосаждения	263
11.3. Адсорбционный контроль соосаждения	271
11.4. Зависимость концентрации примесей в осадке от условий электроосаждения	273
11.5. Факторы, усложняющие кинетику соосаждения	275
11.6. Химическое состояние соосажденной примеси	276
11.7. Включение ингибитора в осадок и ингибирование электроосаждения	277
11.8. Наводороживание осадков	277
11.9. Наводороживание основы: различные механизмы	279
11.10. Водородопроницаемость мембран	281
11.11. Заключение	282
Литература	283
Глава 12. Технология осаждения металлов и сплавов: выбор материалов и электролитов, подготовка поверхности	284
12.1. Выбор материалов	284
12.2. Толщина покрытий	289
12.3. Выбор типа электролита	289
12.4. Химическое и электрохимическое обезжиривание	290
12.5. Травление	292
12.6. Дополнительная подготовка поверхности	294
Литература	295
Глава 13. Технология осаждения металлов и сплавов: электролиты и процессы	296
13.1. Осаждение меди и ее сплавов	296
13.2. Серебро и его сплавы с сурьмой, медью и палладием	307
13.3. Электроосаждение золота и его сплавов	313
13.4. Электроосаждение цинка и его сплавов	319
13.5. Электроосаждение никеля и его сплавов	328

13.6. Электроосаждение хрома	336
13.7. Железо и его сплавы	343
13.8. Легкоплавкие металлы: Bi, Cd, In, Pb, Sb, Sn. Сплав Sn–Pb	347
13.9. Платиновые металлы: Pd, Pt, Rh	356
13.10. Нарушения процессов электроосаждения и возможные при- чины низкого качества покрытий	360
Литература	363
Глава 14. Структура и микроструктура электроосажденных металлов и сплавов	364
14.1. Формирование поликристаллического металла	364
14.2. Границы зерен	366
14.3. Дефекты упаковки и двойниковые границы	370
14.4. Дислокации и дисклинации	373
14.5. Точечные дефекты	375
14.6. Послеэлектролизная релаксация структуры	376
14.7. Техника структурных исследований	380
Литература	383
Глава 15. Физические свойства электроосажденных металлов и спла- вов. Контроль качества и методы испытаний	384
15.1. Введение	384
15.2. Удельное электрическое сопротивление	385
15.3. Измерения удельного электрического сопротивления	388
15.4. Термоэлектродвижущая сила и переходное сопротивление контактов	392
15.5. Магнитные свойства	397
15.6. Пластичность	399
15.7. Предел прочности	400
15.8. Методы измерения прочности и пластичности	403
15.9. Микротвердость	405
15.10. Внутренние напряжения (ВН)	409
15.11. Методы измерения внутренних напряжений	412
15.12. Сцепляемость осадков с основой (адгезия)	414
15.13. Методы обеспечения адгезии	415
15.14. Методы измерения адгезии	417
15.15. Пористость	421
15.16. Коррозионная стойкость	424
15.17. Паяемость	425
15.18. Контроль толщины покрытий	426
15.19. Особенности свойств электролитически осажденных сплавов	429
15.20. Прогнозирование свойств гальванопокрытий	432
Литература	433