

**Р. А. МИРЗОЕВ,
А. Д. ДАВЫДОВ**

АНОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Издание пятое, стереотипное

Учебное пособие



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2026**

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ	9
1.1. Активное растворение металлов	9
1.1.1. Анодное растворение и катодное осаждение металлов. Электродный потенциал	9
1.1.2. Морфология поверхности при активном растворении металлов	13
1.1.3. Активное растворение сплавов	16
1.2. Пассивность металла и пассивное растворение	19
1.2.1. Активно-пассивный переход	19
1.2.2. Механизм и скорость пассивного растворения	24
1.2.3. Транспассивное растворение	28
1.2.4. Усиленное полем растворение пассивирующих оксидных пленок	32
1.3. Пассивное растворение, ограниченное скоростью диффузии в электролит	34
1.3.1. Концентрационные изменения у поверхности металла	34
1.3.2. Выравнивание микрорельефа при диффузионном контроле пассивного растворения	37
1.3.3. Нарушение пассивного состояния. Анодно-анионно-активированное (питтинговое) растворение	42
1.3.4. Неустойчивость фронта оксидирования. Пористое оксидирование (анодирование)	55
1.3.5. Термическая неустойчивость пассивного состояния	67
1.3.5.1. Электротепловой пробой	67
1.3.5.2. Анодно-плазменные (анодно-искровые) процессы	70
1.4. Механизм образования, структура и свойства пассивирующих оксидных пленок	74
1.4.1. Пассивирующие и термические оксидные пленки.	74
1.4.2. Природа точечных дефектов и поведение примесей	80
1.4.3. Рост анодных пленок в гальваностатическом режиме	86
1.4.4. Рост анодных пленок при постоянном потенциале (напряжении)	97
1.5. Классификация анодных и химических процессов обработки поверхности металлов	100
1.5.1. Электрохимические и химические процессы	100
1.5.2. Обобщенная анодная поляризационная кривая	103
1.5.3. Классификация процессов обработки поверхности металлов.	105
Литература к главе 1	109
2. ТРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ	112
2.1. Назначение процессов травления	112
2.2. Травление для очистки от окислов и продуктов коррозии	113

2.2.1. Углеродистые и низколегированные стали	113
2.2.2. Высоколегированные нержавеющие стали аустенитного и ферритного классов	120
2.2.3. Травление меди и медных сплавов	123
2.2.4. Никелевые сплавы	126
2.2.5. Алюминий и алюминиевые сплавы	127
2.2.6. Магниевого сплавы	129
2.2.7. Титан и титановые сплавы	130
2.2.8. Другие металлы и сплавы	134
2.2.9. Травление в пастообразных и гелеобразных растворах	136
2.2.10. Современные тенденции совершенствования процессов травления	137
2.3. Локальное травление металлических изделий для нанесения рисунков и перфорации фольги	138
2.3.1. Углеродистые и низколегированные стали	140
2.3.2. Медь и медные сплавы	142
2.3.3. Алюминий и алюминиевые сплавы	143
2.3.4. Кремний	144
2.3.5. Нержавеющие стали, никелевые и титановые сплавы	144
2.4. Травление с целью развития поверхности	146
2.4.1. Питтинговое травление алюминиевой фольги для электролитических и окисно-полупроводниковых конденсаторов	148
2.4.2. Питтинговое травление металлов для других целей	151
2.5. Металлографическое травление металлов и сплавов	152
2.6. Травление в технологиях микроэлектроники и микромеханики	153
Литература к главе 2	153
3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ	155
3.1. Назначение процессов электрохимического и химического полирования	155
3.2. Механизм сглаживания поверхности при электрохимическом полировании	158
3.3. Морфология электрохимически полированной поверхности	160
3.4. Электролиты для электрохимического полирования	162
3.4.1. Железо и стали	170
3.4.2. Медь и медные сплавы	175
3.4.3. Никель и никелевые сплавы	179
3.4.4. Алюминий и алюминиевые сплавы	180
3.4.5. Серебряные и золотые изделия	185
3.4.6. Титан и его сплавы	188
3.4.7. Другие металлы и сплавы	193
3.5. Химическое полирование	197
3.5.1. Механизм химического полирования	197
3.5.2. Растворы и режимы химического полирования	200

3.6. Электролитно-плазменное полирование	205
3.7. Химико-механическое полирование	210
Литература к главе 3	213
4. ОКСИДИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ	214
4.1. Применение.....	214
4.2. Электрохимическое беспористое (барьерное) окисление металлов	215
4.2.1. Окисление алюминиевой конденсаторной фольги	215
4.2.2. Окисление объемно-пористых анодов конденсаторов из алюминия, тантала, ниобия.....	218
4.2.3. Окисление с целью интерференционного окрашивания.....	219
4.2.4. Пассивирование металлов.....	224
4.2.5. Барьерные пленки в микро- и нанотехнологиях	228
4.3. Пористое окисление металлов	229
4.3.1. Пористое окисление (анодирование) алюминия и его сплавов.....	229
4.3.2. Общие закономерности процесса пористого окисления (анодирования) алюминия	230
4.3.3. Термическая неустойчивость процесса пористого окисления	241
4.3.4. Электролиты и режимы анодирования. Свойства пленок.....	246
4.3.5. Уплотнение и окрашивание пористых анодных пленок	250
4.3.6. Самоорганизация пористой структуры пленок	254
4.3.7. Искусственная организация пористой структуры анодных пленок; монокристаллические пористые пленки	262
4.3.8. Анодирование магния и магниевых сплавов	269
4.3.9. Анодирование титана и его сплавов	274
4.3.10. Пористое окисление железа и сталей	280
4.3.11. Пористое окисление других металлов.....	286
4.4. Плазменно-электролитическое окисление (ПЭО)	291
4.4.1. Терминология и применение	291
4.4.2. Механизм процесса, структура и свойства покрытий	294
4.4.3. Электролиты и режимы.....	301
4.4.4. Магниевые сплавы.....	303
4.4.5. Алюминиевые сплавы	304
4.4.6. Титановые сплавы.....	311
4.4.7. Другие металлы.....	314
Литература к главе 4	315
5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА (ЭХРО)	319
5.1. Введение.....	319
5.2. Процессы на электродах и в межэлектродном пространстве.....	325
5.3. Основы теории формообразования [1].....	329
5.4. Поляризационные кривые при высоких плотностях тока	340
5.5. Импульсная электрохимическая размерная обработка.....	351

5.6. Выбор состава электролита	354
5.7. Циклические режимы	366
5.8. Некоторые другие методы повышения точности	368
5.9. Электрохимическая микрообработка	374
5.10. ЭХРО и сопутствующие процессы	382
5.10.1. Электрохимическое сверление (ЭХС)	382
5.10.2. Электрохимическое удаление заусенцев	389
Литература к главе 5	394
6. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	398
6.1. Электрохимическое шлифование (ЭХШ)	398
6.2. Другие методы абразивно-электрохимической обработки	413
6.2.1. Алмазно-электрохимическое сверление	413
6.2.2. Электрохимическое хонингование и суперфиниширование	414
6.2.3. Абразивно-электрохимическое полирование	415
6.2.4. Анодно (химико)-абразивная обработка деталей во вращающихся барабанах	417
6.3. Электроэрозионно-электрохимическая размерная обработка (ЭЭХО)	418
6.4. Лазерно-электрохимическая обработка	423
6.5. Комбинация методов электрохимической и ультразвуковой обработки	433
Литература к главе 6	434