

Том 1

Список сокращений	8
Введение	10
1. СПОСОБЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	13
1.1. Развитие исследований в области микродугового оксидирования	18
1.2. Микродуговое оксидирование как метод формирования многофункциональных защитных покрытий	22
2. ЭЛЕКТРОФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ.	35
2.1. Механизм формирования анодных оксидных пленок	35
2.2. Сравнительный анализ методов анодирования и микродугового оксидирования	44
2.3. Система «металл—оксид—электролит» и ее особенности	59
2.4. Основные представления о процессе микродугового оксидирования и его механизме	81
3. ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ	155
3.1. Технологические особенности микродугового оксидирования	155
3.2. Влияние технологических параметров МДО на состав, структуру и свойства формируемых многофункциональных покрытий	162
3.3. Формирование МДО-покрытий в электролитах—суспензиях	204
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МДО	252
4.1. Технологические источники тока	253
4.1.1. Преобразователи электрической энергии	258
4.1.2. Системы управления и автоматизации	270
4.1.3. Системы мониторинга	294
4.1.4. Мультирежимный технологический источник тока	305
4.2. Электролитные ванны	318
4.3. Технологическая оснастка	320
4.4. Вспомогательное оборудование	331
4.5. Установки для МДО	336
4.6. Технологическая база данных	342
5. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ	345
5.1. Исследование физико-механических характеристик МДО-покрытий, их состава и структуры	345
5.2. Применение методов резерфордовского и ядерного обратного рассеяния	354
5.3. Коррозионные исследования	361
5.4. Определение сквозной пористости	375
5.5. Трибологические испытания	389

5.6. Теплофизические характеристики	412
5.7. Исследования электрических параметров	421
5.8. Светотехнические и радиационные характеристики МДО-покрытий	425
5.9. Контроль работоспособности электролитов	430
6. МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ	439
7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МДО	514
7.1. Области применения МДО в различных отраслях промышленности	514
7.2. Промышленная апробация и внедрение технологии микродугового оксидирования и МДО-покрытий различного назначения	525
8. ПРИМЕРЫ ИННОВАЦИЙ В ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННО- ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	541
8.1. Особенности технологий МДО и электрохимико-термической обработки в единой группе процессов плазменно- электролитического модифицирования поверхности	541
8.2. Применение МДО при производстве электролитических конденсаторов	560
8.3. Улучшение различных характеристик МДО-покрытий с использованием метода инфильтрации (наполнения)	564
8.4. Возможности использования МДО в сфере медицинской техники	590
Заключение	599
Литература	603
Сведения об авторах	647

Том 2

ВВЕДЕНИЕ	
1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЛИТНОГО НАГРЕВА	
1.1. Образование парогазовой оболочки	
1.2. Проводимость стационарной анодной оболочки	
1.3. Влияние условий нагрева на температуру анода	
1.3.1. Нагрев в условиях продольного обтекания детали	
1.3.2. Особенности нагрева в непроточном электролите	
1.4. Распределение температуры в нагреваемых деталях	
1.5. Источники тепла в парогазовой оболочке	
1.6. Теплообмен между оболочкой и нагреваемой деталью-анодом	
1.6.1. Метод регулярного теплового режима первого рода	
1.6.2. Стационарный нагрев цилиндрической детали	
1.6.3. Нестационарный нагрев торцевой поверхности	
1.7. Теплообмен между оболочкой и электролитом	
1.8. Тепло, затраченное на испарение электролита	

- 1.9. Модели расчета вольтамперных и вольт-температурных характеристик
- 1.10. Профиль парогазовой оболочки
- 2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АНОДНОГО НАГРЕВА
 - 2.1. Закономерности убыли массы стальных анодов
 - 2.2. Особенности образования оксидного слоя
 - 2.3. Растворение титана, хрома, меди
 - 2.4. Динамика изменения состава электролита
- 3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
 - 3.1. Закалка
 - 3.2. Отпуск наклепанной стали
- 4. АЗОТИРОВАНИЕ И НИТРОЗАКАЛКА
 - 4.1. Особенности диффузионного насыщения при электролитном нагреве
 - 4.2. Составы электролитов для насыщения сталей азотом
 - 4.3. Состав и структура азотированных слоев
 - 4.4. Кинетика насыщения железа азотом
 - 4.5. Трение и износ азотированных слоев
 - 4.6. Нитрозакалка среднеуглеродистых сталей
 - 4.6.1. Фазовый состав и структура поверхностного слоя
 - 4.6.2. Распределение микротвердости и поверхностная твердость
 - 4.6.3. Прочность, пластичность и ударная вязкость
 - 4.6.4. Усталостная прочность и остаточные напряжения
 - 4.6.5. Трение и износ
- 5. ЦЕМЕНТАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА
 - 5.1. Составы электролитов для цементации
 - 5.2. Фазовый состав диффузионных слоев
 - 5.3. Кинетика насыщения углеродом
 - 5.4. Свойства цементированных слоев
 - 5.5. Выработка электролитов и рекомендации по их применению
 - 5.6. Контроль качества цементированных слоев
- 6. НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ
- 6.1. Составы электролитов для нитроцементации
- 6.2. Фазовый состав и структура нитроцементованных слоев
- 6.3. Кинетика нитроцементации
- 6.4. Механические свойства нитроцементованных сталей

7. ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ	
7.1 Анодная нитрозакалка	
7.2. Оксидирование в ацетате аммония	
7.3. Нитроцементация сталей и цементация алюминиевого сплава	
8. Другие виды электрохимико-термической обработки	
8.1. Борирование.....	
8.2. Сульфидирование	
8.3. Вольфрамирование	
8.4. Насыщение сталей молибденом, ванадием и титаном	
8.5. Обезуглероживание сталей	
9. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ...	
9.1. Концевой и полный нагрев	
9.2. Способы и устройства выравнивания температуры нагреваемых изделий	
9.3. Последовательный нагрев	
9.4. Струйный нагрев	
9.5. Дополнительные воздействия на электролитный нагрев.....	
9.6. Установки электролитного нагрева	
10. ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	
10.1. Характеристики нагрева технического титана.....	
10.2. Насыщение титана азотом и кислородом	
10.3. Нитроцементация и борирование титана	
10.4. Комбинированная обработка титановых сплавов	
11. ОЧИСТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	
12. КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ	
Заключение	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	

Том 3

Список сокращений	11
Введение	13
1. ЛАЗЕРНО-МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	16
1.1. Сущность лазерно-магнитного метода и классификация его основных схем	16
1.2. Обоснование возможностей создания лазерно-магнитных технологий и конструктивно-технологический анализ объектов лазерно-магнитной обработки	25
1.3. Анализ научных работ в области лазерно-магнитных технологий	36

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ, ИНДУЦИРОВАННЫМИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ .41	
2.1. Формирование поверхностных электромагнитных волн под действием лазерного излучения и их взаимодействие с внешним полем	42
2.2. Взаимодействие внешнего магнитного поля со спонтанными магнитными полями светозероизионной плазмы	49
2.2.1. Определение яркостной температуры светозероизионной плазмы при действии внешнего магнитного поля	53
2.2.2. Изменение прозрачности светозероизионной плазмы в зоне действия внешнего магнитного поля	55
2.2.3. Оценка степени влияния внешнего магнитного поля на спонтанные магнитные поля в светозероизионной плазме	58
2.2.4. Исследование особенностей истечения светозероизионной плазмы из зоны облучения при действии внешнего магнитного поля	61
2.3. Воздействие внешнего магнитного поля на жидкую фазу продуктов световой эрозии	64
3. РАЗВИТИЕ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНО-МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКЕ . 75	
3.1. Инициирование импульсного электрического разряда под действием лазерного излучения	76
3.2. Эрозия электродов в зоне развития импульсного электрического разряда	85
3.3. Локализация электромагнитной энергии в зоне развития импульсного электрического разряда	89
3.4. Развитие газодинамических процессов в зоне импульсного электрического разряда	92
3.5. Распределение продуктов электрической эрозии в потоке плазмы при ее истечении через канал отверстия	103
3.6. Взаимодействие светозероизионной плазмы со стенками канала отверстия	108
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ЛАЗЕРНО-МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ	115
4.1. Получение глубоких отверстий лазерным излучением при действии внешнего продольного магнитного поля	116
4.1.1. Исследование влияния режимов лазерно-магнитной обработки на геометрию отверстий	117
4.1.2. Оценка качества отверстий	125
4.2. Получение отверстий высокой точности лазерным излучением при действии импульсного электрического разряда	127
4.2.1. Формообразование отверстий в неметаллических материалах на этапе лазерной обработки	128
4.2.2. Формообразование отверстий на этапе развития импульсного электрического разряда	137
4.2.3. Оценка качества отверстий	140
5. ФОРМИРОВАНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ И ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ОТВЕРСТИЯХ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ОДНОВРЕМЕННЫМ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ОТВЕРСТИЙ	143
5.1. Формообразование отверстий с токопроводящими покрытиями	144

5.1.1. Исследование механизма взаимодействия паровой и жидкой фаз продуктов электрической эрозии со стенками канала отверстия	145
5.1.2. Разработка и исследование методов управления процессами получения токопроводящих покрытий . . .	148
5.1.3. Определение режимов напыления токопроводящих покрытий	154
5.1.4. Оценка качественных характеристик покрытий	160
5.2. Исследование особенностей формообразования отверстий с защитными покрытиями	164
5.2.1. Методика исследования основных характеристик защитных покрытий	165
5.2.2. Определение геометрических параметров отверстий под защитные покрытия и оценка состояния их поверхностного слоя	167
5.2.3. Алюминирование каналов отверстий	169
5.2.4. Меднение каналов отверстий	173
5.2.5. Формирование молибденовых покрытий	176
5.2.6. Формирование вольфрамовых покрытий	179
5.2.7. Управление процессом формирования покрытий	183
6. МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНО-МАГНИТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ И УПРОЧНЕНИЕМ	187
6.1. Особенности структурно-фазовых преобразований в материалах под действием лазерного излучения и внешнего магнитного поля	187
6.2. Исследование основных процессов поверхностного лазерно-магнитного легирования и определение технологических возможностей метода	191
6.2.1. Определение геометрических параметров зоны расплава	192
6.2.2. Исследование массопереноса и распределения легирующих элементов в области действия лазерного излучения и магнитного поля	195
6.2.3. Исследование изменения физико-механических свойств материалов после лазерно-магнитного легирования	200
6.2.3.1. Исследование характера изменения микротвердости в зоне легирования	200
6.2.3.2. Исследование прочностных характеристик образцов после лазерно-магнитного легирования	203
6.3. Лазерно-магнитное упрочнение	208
6.3.1. Исследование влияния магнитного поля на изменение структуры материалов после лазерно-магнитного упрочнения	209
6.3.2. Исследование физико-механических и эксплуатационных характеристик материалов после лазерно-магнитного упрочнения	216
7. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ ЛАЗЕРНО-МАГНИТНОГО МЕТОДА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ	226
7.1. Последовательность построения технологического процесса получения отверстий с токопроводящими покрытиями в печатных платах	226
7.2. Пример разработки технологического процесса получения металлизированных отверстий в платах изделий СВЧ-техники	231
7.3. Упрочнение режущего инструмента	234

7.4. Перспективы развития лазерно-магнитного метода	237
8. КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ ПИРОЛИТИЧЕСКИХ КАРБИДОХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ	243
8.1. Метод осаждения из газовой фазы	243
8.1.1. Напыление чистого хрома	243
8.1.2. Напыление металлических сплавов на основе хрома	246
8.1.3. Напыление карбида хрома	247
8.1.4. Пиролитическое осаждение карбидохромовых покрытий	250
8.2. Оборудование для нанесения пиролитических карбидохромовых покрытий	261
8.2.1. Испарители металлоорганических соединений и реакторное оборудование	262
8.2.2. Установки для нанесения покрытий на мелкие детали	265
8.2.3. Установки для нанесения покрытий на крупногабаритные и длинномерные изделия	270
8.2.4. Нанесение пиролитических карбидохромовых покрытий на мелкодисперсные частицы (порошок)	280
8.3. Структурные особенности, состав, свойства, оценка эксплуатационных характеристик пиролитических карбидохромовых покрытий	285
8.3.1. Структура и состав пиролитических карбидохромовых покрытий	285
8.3.2. Свойства пиролитических карбидохромовых покрытий	290
8.3.3. Оценка эксплуатационных характеристик пиролитических карбидохромовых покрытий	291
8.4. Технология нанесения пиролитических карбидохромовых покрытий	297
8.4.1. Основные технологические аспекты получения пиролитических карбидохромовых покрытий из хромоорганической жидкости	297
8.4.2. Факторы, определяющие качество покрытий	302
8.4.3. Стадия подготовки поверхности изделий перед нанесением пиролитических карбидохромовых покрытий	303
8.4.3.1. Требования к механической обработке деталей	304
8.4.3.2. Обезжиривание и травление изделий	305
8.4.3.3. Электрохимическое и химическое полирование	307
8.4.3.4. Химическая модификация поверхности изделий	307
8.4.4. Стадия подготовки хромоорганической жидкости «БАРХОС»	307
8.4.4.1. Очистка оборудования для работы с «БАРХОС» и стабилизирующей добавкой .	307
8.4.4.2. Подготовка «БАРХОС»	308
8.4.4.3. Подготовка стабилизирующей добавки	309
8.4.4.4. Подготовка полученной смеси к работе	309
8.4.5. Стадия газофазной карбидизации	310
8.4.5.1. Процесс газофазной карбидизации	310
8.4.5.2. Параметры процесса газофазной карбидизации	312

8.4.5.3. Контроль сплошности и толщины покрытий . . .	313
8.4.5.4. Способы удаления некачественных карбидохромовых покрытий	313
8.4.5.5. Воздействие технологии получения пиролитических карбидохромовых покрытий на окружающую среду	315
8.4.5.6. Основные правила безопасной работы с хромоорганической жидкостью «БАРХОС» на установках для нанесения покрытий	316
9. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ	318
9.1. Структура и свойства сталей при лазерном воздействии	318
9.2. Влияние лазерной обработки на структуру и свойства газотермических покрытий . . .	335
9.3. Расчет и прогнозирование температуры и глубины зоны лазерного воздействия при лазерном модифицировании порошковых сталей и покрытий	349
9.4. Лазерное термическое модифицирование порошковых углеродистых сталей	354
10. ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ И НЕПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ	364
10.1. Электроразрядная обработка покрытий и непроводящих материалов	364
10.2. Локальная электроэрозионная размерная обработка покрытий и диэлектриков	367
10.3. Оптико-кавитационная обработка покрытий и непроводящих материалов	370
10.3.1. Оптико-кавитационная обработка покрытий и керамики	370
10.3.2. Оптико-кавитационно-абразивная обработка покрытий и керамики	373
10.4. Гидрооптическая обработка покрытий и диэлектрических материалов	375
Заключение	381
Литература	382
Сведения об авторах	399