

УДК 539.3, 620.23, 620.22  
А21, Ф50

Интернет-магазин

МАТЕСС

<http://shop.rcd.ru>

- физика
- математика
- биология
- нефтегазовые технологии

**Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д.**

Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства). В 2-х томах. Т. I. – Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 590 стр.

В первой части приведены результаты фундаментальных опытов, приведших к открытию электропластического эффекта (ЭПЭ) и составляющих основу электропластической деформации металлов. Показано, что ЭПЭ – это новое физическое явление нетеплового происхождения, нетеплового действия тока высокой плотности (порядка  $10^5$ – $10^6$  А/см<sup>2</sup>) на пластическую деформацию металлов. Дано определение и содержание критических интенсивных технологий обработки материалов давлением (ОМД) с использованием ЭПЭ в качестве фактора интенсификации процесса. Определены сферы технологического применения ЭПЭ при прокате, волочении, плющении и штамповке металлов, а также при других видах тонкого и среднетонкого металлургического передела, в которых экономически оправдано и целесообразно использовать токи высокой плотности в импульсном режиме для стимулирования без большого нагрева материала процессов ОМД. Показано, что при этом достигается выигрыш в повышении пластичности материала (включая остаточную пластичность) и в снижении усилий деформации при ОМД, а также в улучшении физико-механических свойств и фазового состава материала заготовок после ОМД.

Детально исследованы структурные аспекты электропластической деформации металлов и сплавов. Описаны методы залечивания дефектов в металлических материалах импульсным током. Исследован процесс упрочнения быстрорежущих инструментальных сталей при действии импульсами электрического тока. Изучено действие электростатических полей на процесс деформации и механические свойства металлов и сплавов.

**ISBN 5-93972-335-7**

© О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, 2004

© Институт компьютерных исследований, 2004

<http://rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

## Содержание

Предисловие .....	8
<b>ГЛАВА I. ИНТЕНСИВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ОМД И ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....</b>	<b>10</b>
1.1. Интенсивные электротехнологии ОМД и технологии двойного назначения	10
1.2. Техничко-экономические показатели новой технологии ОМД.....	13
1.2.1. Определение областей применения ЭПЭ и вида тока .....	13
1.2.2. Прокатка с током .....	15
1.2.3. Волочение с током .....	15
1.2.4. Штамповка с током .....	16
<b>ГЛАВА II. ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>17</b>
2.1. ВВЕДЕНИЕ.....	17
2.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА .....	18
2.3. РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ОБ ЭЛЕКТРОННО-ПЛАСТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ .....	39
2.4. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В РАБОТАХ АМЕРИКАНСКИХ УЧЕНЫХ .....	41
2.5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.....	43
2.6. ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ДЕЙСТВИЯ ТОКА ОТ АМПЛИТУДЫ, ЧАСТОТЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ТОКА .....	62
2.7. ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ЧЕРЕЗ СКАЧКООБРАЗНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ НА ПРОЦЕСС ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ.....	83
2.8. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО И ПИНЧ-ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА.....	101
2.8.1. Тепловой эффект .....	101
2.8.2. Пинч-действие импульсного тока .....	111
2.9. ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА И НАЛИЧИЯ В МЕТАЛЛЕ ПРИМЕСЕЙ .....	126
2.9.1. Зависимость эффекта от приложенных напряжений и деформаций. ....	126
2.9.2. Влияние примесей и ориентации кристаллов. ....	134
2.9.3. Влияние скорости деформирования кристаллов.....	140
2.9.4. Температурная зависимость эффекта.....	143
2.9.5. Выводы .....	147
2.10. ПОЛЯРНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ТОКА И ДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛА .....	149
2.11. РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ В ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ .....	170
2.11.1. Параметры поверхности Ферми .....	171
2.11.2. Особенности импульсной токовой методики.....	171
2.11.3. Роль электронов и «дырок» в ЭПЭ.....	172
2.11.4. Роль закрытости поверхности Ферми .....	172
2.11.5. Предпочтительное направления смещения поверхности Ферми .....	174
2.11.6. Роль малых фрагментов поверхности Ферми.....	176
2.11.7. Трансформация поверхности Ферми металла в ходе электропластической деформации .....	176
2.11.8. Передача импульсов силы и энергии от фермиевских носителей на дислокации.....	178
2.11.9. Влияние электрического контакта на уровень поверхности Ферми .....	179
2.12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	180
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ II .....	183

<b>ГЛАВА III. СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>189</b>
3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИКЕЛЯ, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ. ....	189
3.1.1. Материал и методики исследования. ....	189
3.1.2. Влияние импульсов электрического тока на закономерности формирования дислокационной структуры никеля при электропластической деформации. ....	191
3.1.3. Заключение .....	199
3.2. СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т .....	199
3.2.1. Исследование структуры стали 12Х18Н10Т после деформации обычным растяжением и ЭПД .....	199
3.2.2. Структурное и физико-механическое исследование стали 12Х18Н10Т после электропластического волочения .....	203
Результаты эксперимента и их обсуждение. ....	204
3.2.3. Структурные изменения в стали 12Х18Н10Т после электропластической прокатки .....	208
3.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ .....	224
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ III .....	227
<b>ГЛАВА IV. ДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>233</b>
4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МАТЕРИАЛЫ .....	233
4.2. ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....	235
4.2.1. Методика обработки импульсным электрическим током .....	235
4.2.2. Механические свойства материалов, подвергнутых обработке ИЭТ .....	237
4.2.3. Характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении материалов, подвергнутых обработке ИЭТ .....	238
4.3. ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОЛЯ (ВЭМП) НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т .....	241
4.3.1. Материал и методы исследования .....	241
4.3.2. Изменение прочности и пластичности при действии импульсного ВЭМП .....	242
4.4. ВЫВОДЫ .....	253
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ IV .....	254
<b>ГЛАВА V. ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ И ЗАЛЕЧИВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ .....</b>	<b>257</b>
5.1. ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЗАЛЕЧИВАНИЕ ДЕФЕКТОВ. ....	257
5.1.1. Способы восстановления свойств тяжело нагруженных деталей .....	257
5.1.2. Металлофизические вопросы зарождения и заживления дефектов. ....	259
5.1.3. Заключение .....	263
5.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА. ....	264
5.2.1. Подготовка образцов .....	264
5.2.2. Механические испытания .....	264
5.2.3. Метод определения плотности деформированных металлов .....	265
5.2.4. Обработка металлов импульсным электротоком (ИЭТ) .....	266

5.2.5. Исследование дефектообразования при обработке импульсным электротоком (ИЭТ).....	266
5.3. Влияние ОБРАБОТКИ ИЭТ НА ДЕФЕКТЫ ДЕФОРМИРОВАННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 08X18H10T и 12X18H10T .....	268
5.4. Выводы.....	274
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ V .....	275

## **ГЛАВА VI. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЫСТРОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА .....**

6.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ ПРИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВЕ .....	278
6.1.1. Введение.....	278
6.1.2. Термическая обработка при быстром нагреве .....	278
6.1.3. Новые технологии упрочнения быстрорежущих инструментальных сталей. ....	279
Выводы. Постановка задачи исследования .....	282
6.2. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ .....	282
6.2.1. Энергетический источник, системы регистрация параметров внешнего воздействия. ....	282
6.2.2. Установка для комплексных физико-механических исследований материалов при воздействии импульсного электрического тока.....	284
6.2.3. Устройства для обработки импульсным электрическим током металлорежущего инструмента и образцов металлов .....	284
6.3. ДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ Р6М5.....	287
6.3.1. Экспериментальные результаты и их обсуждение .....	288
6.3.2. Исследование структуры карбидов, выделяющихся из мартенсита при обработке импульсным электрическим током. ....	293
6.3.3. Исследование влияния размеров карбидных фаз на физико-механические свойства стали Р6М5 после обработки ИЭТ .....	296
6.3.4. Анализ результатов .....	300
6.3.5. Анализ процесса роста карбидных частиц .....	309
6.3.6. Растворение включений в сталях, подвергнутых обработке импульсным электрическим током .....	313
6.4. Выводы .....	315
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ VI.....	316

## **ГЛАВА VII. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИИ, СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....**

7.1. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ .....	320
7.1.1. Введение.....	320
7.1.2. Влияние электростатических полей на механические свойства металлических материалов.....	321
7.1.3. Энергия незаряженного проводника находящегося в однородном внешнем электрическом поле $\vec{E}$ .....	323
7.1.4. Силы, действующие на проводник в поле $\vec{E}$ .....	324
7.1.5. Пондеромоторные силы в конденсаторе.....	325

7.1.6.	Связь поверхностного натяжения и заряда на поверхности металла .....	326
7.1.7.	Автоэлектронная эмиссия (туннельный эффект).....	327
7.1.8.	Распределение электронной плотности вблизи поверхности металла .....	328
7.1.9.	Электронное распределение во внешнем электрическом поле $\vec{E}$ .....	332
7.1.10.	Поверхностный барьер на границе металл-вакуум во внешнем электрическом поле.....	336
7.1.11.	Проникновение электрического поля в металла и его влияние на величину поверхностного барьера .....	338
7.1.12.	Электронное распределение вблизи границы металла с диэлектрической средой .....	342
7.1.13.	Заключение .....	346
7.2.	ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ .....	347
7.2.1.	Материал и методики исследования .....	347
7.2.2.	Экспериментальные данные.....	348
7.2.3.	Анализ деформационных кривых.....	354
7.2.4.	Расчет деформационных характеристик поверхностного слоя металлов, деформированных в электростатическом поле .....	368
7.2.5.	Заключение .....	375
7.3.	СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ .....	377
7.3.1.	Электронно-микроскопические исследования никеля .....	377
7.3.2.	Рентгенографические исследования параметров микроструктуры никеля, деформированного в электрическом поле .....	392
7.3.3.	Исследование текстуры никеля деформированного в электростатическом поле.....	395
7.4.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ .....	399
7.4.1.	Влияние электростатического поля на энергию образования поверхностной ступеньки скольжения в металле .....	399
7.4.2.	Влияние энергии ступеньки на упрочнение металлов при деформации в электростатическом поле.....	403
7.5.	МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	409
7.5.1.	Основные экспериментальные факты .....	409
7.5.2.	Пондеромоторное давление электрического поля.....	410
7.5.3.	Влияние полей рассеяния .....	411
7.5.4.	Вклад электростатического поля в энергию образования поверхностного рельефа .....	414
7.5.5.	Влияние зазора между диэлектриком и образцом на пондеромоторные силы .....	422
7.5.6.	Обсуждение результатов .....	422
7.5.7.	Заключение .....	423
	ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ VII .....	424
	<b>ГЛАВА VIII. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ.....</b>	<b>430</b>
8.1.	ВВЕДЕНИЕ.....	430
8.2.	ВОЛОЧЕНИЕ С ТОКОМ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ .....	432
8.3.	ВОЛОЧЕНИЕ С ТОКОМ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ.....	451

8.4. ДЕФОРМАЦИЯ С ТОКОМ ВОЛЬФРАМОВОЙ И МОЛИБДЕНОВОЙ ПРОВОЛОКИ .....	482
8.4.1. Растяжение с постоянной скоростью .....	482
8.4.2. Волочение с током вольфрамовой проволоки.....	488
8.4.3. Структурные исследования .....	492
8.4.4. Волочение с током молибденовой проволоки.....	495
8.4.5. Сопоставление разных металлов .....	500
8.4.6. Выводы и рекомендации .....	502
8.5. ПРОКАТКА С ТОКОМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	504
8.5.1. Особенности процесса электропластической прокатки металлов .....	504
8.5.2. Способ подведения тока от вала к валку .....	504
8.5.3. Способ подведения тока передним скользящим контактом и через валки .....	505
8.5.4. Способ подведения тока двумя контактами до и после зоны ЭПП между валками .....	505
8.5.5. Возможность использования постоянного тока для реализации ЭПП .....	507
8.5.6. Использование импульсного тока для реализации ЭПП.....	508
8.5.7. Оценка сопутствующего ЭПП теплового эффекта при использовании импульсного тока .....	508
8.5.8. Влияние скорости прокатки на параметры ЭПП .....	510
8.5.9. Примерные параметры импульсного тока для осуществления высокоскоростной ЭПП тонких заготовок .....	510
8.5.10. Возможность автоматического регулирования ЭПП металлических заготовок .....	513
8.5.11. Изменение силовых параметров прокатки под влиянием ЭПЭ .....	514
8.5.12. Прокатка с током медной полосы и других металлов .....	516
8.6. ШТАМПОВКА МЕТАЛЛА С ТОКОМ .....	524
8.7. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПЛЮЩЕНИЕ .....	530
8.8. ИСТОЧНИКИ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ .....	537
8.8.1. Введение.....	537
8.8.2. Выбор вида тока, формы импульсов и режимов тока .....	537
8.8.3. Источники импульсного тока .....	540
8.8.4. Управляемый источник постоянного тока .....	548
8.8.5. Схема питания со смешанным управлением.....	551
8.9. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДВЕДЕНИЯ ТОКА В ЗОНУ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА .....	552
8.10. СТАНЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ.....	567
8.11. СТАНЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛА И ПЛЮЩЕНИЯ ЛЕНТЫ.....	571
8.12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	580
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ VIII .....	586