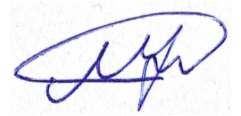


На правах рукописи



МОРКИНА АЛИНА ЮРЬЕВНА

**ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИ
ЧИСТЫХ МЕДИ, АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВОГО
СПЛАВА 6101**

Специальность 1.3.8. — Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Уфа - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: **Дмитриев Сергей Владимирович**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Физики твердого тела, Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, г. Уфа

Официальный оппонент: **Астафурова Елена Геннадьевна**

доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией Физики иерархических структур в металлах и сплавах, главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Официальный оппонент: **Корольков Олег Евгеньевич**

кандидат технических наук, научный сотрудник, ФГБУН Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), г. Москва

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета 24.2.308.01 при ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» по адресу: 360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского 173, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Дышеков Артур Альбекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Металлы и сплавы широко используются в промышленности; технологии их формоизменения и эксплуатационные характеристики напрямую связаны с возможностью управления их пластической деформацией. Традиционные методы обработки давлением и термической обработки часто требуют значительных энергозатрат, могут приводить к нежелательным изменениям структуры: росту зерна, фазовым переходам, выделению или растворению вторичных фаз и т.п. В связи с этим поиск энергоэффективных методов воздействия на деформационное поведение металлических материалов без отрицательного влияния на их микроструктуру является важной задачей.

Одним из перспективных направлений является использование электропластического эффекта (ЭПЭ), который позволяет добиться снижения напряжения течения и повышения пластичности металлов без чрезмерного разогрева за счет пропускания импульсного электрического тока в процессе деформации. Несмотря на многолетнюю историю изучения ЭПЭ, не до конца решенными остаются вопросы о влиянии параметров импульсного тока (длительность, частота, скважность, форма импульса) на механизмы деформации в зависимости от структурного состояния материала. Трудности в изучении ЭПЭ связаны с многообразием физических эффектов, наблюдаемых при пропускании быстропеременного тока высокой плотности через металл (джоулев нагрев, неравномерное выделение джоулева тепла преимущественно на дефектах, действие электронного ветра на дефекты, скин-эффект, пинч-эффект и др.). Кроме того, необходимо учитывать химический и фазовый состав сплавов, их структурное состояние. Особый интерес представляет сравнение металлов с разной энергией дефекта упаковки, например, меди и алюминия, и установление влияния примесей.

Основным вопросом, рассматриваемым исследователями при изучении ЭПЭ, является разделение термического и атермического вкладов в электропластическую деформацию. Традиционно ЭПЭ изучают в опытах на растяжение (реже на сжатие) при контроле скорости деформации, измеряя при этом, как импульсы тока влияют на напряженное состояние образца. Контроль джоулева тепловыделения производят с помощью термопар или тепловизора, что дает лишь оценочные данные. Принципиально важно разработать экспериментальные методики, позволяющие с большой точностью контролировать джоулев разогрев металла, что позволит обоснованно отделить термический и атермический вклады в ЭПЭ.

В свете вышеизложенного изучение ЭПЭ на образцах с контролируемыми химическим составом и микроструктурой, при точном измерении выделения джоулева тепла в зависимости от параметров импульсного тока, является актуальной задачей, решение которой позволит разделить вклады тепловых и нетепловых эффектов и будет способствовать уточнению физической природы ЭПЭ. Практическая значимость решения этой задачи обусловлена широкими возможностями использования ЭПЭ при обработке металлов давлением.

Степень разработанности темы исследования. ЭПЭ был открыт в 1960-х годах О.А. Троицким и с тех пор активно исследуется. В литературе накоплен обширный экспериментальный материал, касающийся влияния постоянного и импульсного тока на механические свойства многих металлов и сплавов. Предложены физические механизмы ЭПЭ: джо-

улев нагрев, сила электронного ветра, открепление дислокаций от препятствий, изменение энергии активации движения дислокаций и магнитопластические эффекты.

Надежно установлено, что ЭПЭ наблюдается при плотности тока выше пороговой, во многих случаях в интервале 10^3 – 10^4 А/мм², при этом точные пороговые значения зависят от материала и параметров импульса, что показано в работах Столярова с соавторами [1] и Оказаки с соавторами [2]. Существенное значение имеют параметры импульсного тока, такие как длительность, плотность тока, скважность и даже форма импульсов [3]. Основным вопросом при изучении ЭПЭ является отделение термического и атермического вкладов в пластическую деформацию; для различных металлов и сплавов эти вклады могут существенно варьироваться при одинаковых параметрах тока. В обзорных работах [4,5] предложены многочисленные применения ЭПЭ, включая электростимулирование процессов листовой штамповки, волочения, прокатки, прессования, а также обработки резанием.

Много усилий прилагается для создания физических моделей, описывающих пластическую деформацию, стимулированную электрическим током. В недавней работе Абдуллиной с соавторами [6] убедительно показана важность рассмотрения задачи теплопроводности при учете баланса между джоулевым теплом, выделяющимся на дислокациях, и теплом, диссипирующим в бездефектные участки зерна. Скорость выделения джоулева тепла на дефектах возрастает с увеличением плотности тока в импульсе, в то время как скорость отвода тепла определяется характеристиками металла и падает с увеличением температуры. Зная баланс между притоком и оттоком тепла, можно описать температурный режим дислокаций и других дефектов во время прохождения импульса тока и тем самым судить о повышении их подвижности.

Помимо основных эффектов взаимодействия электромагнитных полей с металлами в литературе рассматриваются важные сопутствующие физические эффекты, к которым относятся скин-эффект, приводящий к неравномерному распределению плотности переменного тока по сечению проводника, что приводит к преимущественному нагреву приповерхностных слоев, а также пинч-эффект, приводящий к сжатию образца перпендикулярно направлению тока. Вклад этих эффектов в наблюдаемое снижение напряжения течения остается недостаточно изученным. Во многих экспериментальных работах скин-эффект считается малым, что может стать необоснованным на частотах импульсов свыше единиц и десятков кГц, особенно для магнитных металлов.

Большинство работ выполнено при недостаточно точном контроле тепловыделения на образцах, что затрудняет разделение термического и атермического вкладов. Систематические исследования влияния длительности и амплитуды импульсов тока и уровня нагрева в привязке к температурам плавления, для разных структурных состояний, выполнены в недостаточном объеме. Малоизученными остаются вопросы о роли дислокаций и примесных атомов в реализации нетепловых механизмов, а также о сравнительном поведении ГЦК-металлов с различной энергией дефекта упаковки при электропластической деформации.

Цель работы – установление закономерностей влияния параметров импульсного тока (плотность тока и длительность импульса) и структурного состояния (исходное и отожжен-

ное) на ЭПЭ в медных и алюминиевых проволоках, а также выявление роли примесей и уровня энергии дефекта упаковки в электропластической деформации при точном контроле джоулева тепловыделения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать экспериментальную установку для исследования ЭПЭ при растяжении проволочных образцов с возможностью точного контроля джоулева нагрева по их тепловому расширению и варьирования параметров импульсного тока (плотность тока и длительность импульса).

2. Разработать численную модель динамики упруго-пластического проволочного образца с присоединенной массой после мгновенного нагрева образца электрическим импульсом и сопоставить результаты моделирования с экспериментом.

3. Изучить влияние импульсов тока на накопление пластической деформации в образцах из технически чистых меди М1 и алюминия КАС 8176, а также из алюминиевого сплава 6101 в зависимости от растягивающего напряжения и структурного состояния.

4. Провести систематическое сравнение влияния длительности импульса и плотности тока на электропластическую деформацию образцов при джоулевом нагреве до заданной температуры, отнесенной к температуре плавления.

5. На основе полученных экспериментальных данных разработать физическую модель дислокационной электропластичности, учитывающую процесс выделения тепла на дислокациях и его диссипацию в кристаллическую решетку.

Методология и методы исследования. Работа выполнена с применением экспериментальных, теоретических и численных методов. Электропластическая деформация проволок из меди М1, алюминия КАС 8176 и сплава 6101 исследовалась при растяжении под действием импульсного электрического тока; джоулев нагрев определялся по тепловому удлинению образцов. Микроструктура изучалась методом EBSD, механические свойства — испытаниями на растяжение, динамика системы «образец–груз» — численным моделированием упруго-пластического отклика.

Соответствие паспорту специальности 1.3.8. Работа соответствует заявленной специальности, поскольку посвящена исследованию связи электрических, тепловых, структурных и механических свойств металлических материалов при пластической деформации. Рассмотрены дислокационные механизмы, влияние дефектной структуры, размера зерна, примесей и параметров импульсного тока на электропластический эффект в металлах и сплавах.

Объект и предмет исследования. Объект исследования — технически чистые медь М1, алюминий КАС 8176 и алюминиевый сплав 6101 в виде проволочных образцов в исходном и отожженном состояниях. Предмет исследования — закономерности электропластической деформации указанных материалов при импульсном токовом воздействии, включая влияние плотности тока, длительности импульса, джоулева нагрева, структурного состояния и примесного состава.

Научная новизна:

1. Создана экспериментальная установка для исследования ЭПЭ на проволочных образцах, растягиваемых мертвым грузом, позволяющая с высокой точностью контролировать джоулев разогрев по тепловому удлинению образцов.

2. Разработана и изучена модель системы «образец–груз» с учетом упруго-пластического поведения материала, позволившая количественно оценить вклад динамических эффектов, возникающих за счет мгновенного нагрева образца импульсом тока, в дополнительную пластическую деформацию.

3. Впервые проведено систематическое исследование электростимулированной пластической деформации образцов из технически чистых меди М1 и алюминия КАС 8176, а также из алюминиевого сплава 6101 в зависимости от растягивающего напряжения и структурного состояния при точном контроле джоулева тепловыделения. Обнаружено, что прирост пластической деформации при фиксированном растягивающем напряжении уменьшается от импульса к импульсу, что можно объяснить закреплением дислокаций на все более сильных стопорах. Увеличение размера зерна при отжиге меди привело к повышению подвижности дислокаций и, следовательно, к усилению ЭПЭ. Для алюминия отжиг не оказал существенного влияния, поскольку размер зерна изменился незначительно. Установлено, что присутствие примесей в сплаве 6101 и дисперсионное упрочнение ускоряют затухание ЭПЭ от импульса к импульсу и требуют более высокой плотности тока для достижения сопоставимого прироста пластической деформации, что связано с более интенсивным джоулевым нагревом кристаллической решетки.

4. Впервые выполнено систематическое сравнение влияния длительности и плотности тока импульса на ЭПЭ для образцов из меди и алюминия при одинаковых значениях нормированного прироста температуры $\Delta T/T_m$: 0,016, 0,027 и 0,038 (22, 36, 51 К для меди и 15, 25, 35 К для алюминия). Показано, что для меди малая длительность импульса неизменно эффективнее, тогда как для алюминия наблюдается инверсия влияния длительности импульса: при низких температурах нагрева (15 и 25 К) большую эффективность дают короткие импульсы (высокая пиковая плотность тока), а при повышенной (35 К) — длительные импульсы. Смена тренда может быть объяснена динамическими эффектами, наблюдаемыми в системе «образец–груз» при пропускании импульсов тока.

5. На основе полученных экспериментальных данных разработана физическая модель дислокационной электропластичности, согласно которой необходимо рассматривать баланс между выделением джоулева тепла на ядрах дислокаций и его диссипацией в решетку за счет теплопроводности. При низкой плотности тока в импульсе тепло, выделяющееся на дислокациях, успевает диссипировать в решетку, что снижает проявление ЭПЭ, приводя к росту температуры металла без заметной пластической деформации. Более высокая плотность тока в импульсе приводит к более интенсивному нагреву дислокаций, что повышает их подвижность и способность отрываться от стопоров, при этом средний по объему нагрев металла незначителен и ЭПЭ проявляется ярче.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в выявлении взаимосвязи параметров импульсного тока (длительности, пиковой плотности) с интегральным на-

гревом и с механизмами пластической деформации ГЦК-металлов с различным размером зерна, обладающих различной энергией дефекта упаковки и примесным составом, что расширяет представления о природе нетепловых эффектов и роли дислокационно-электронных взаимодействий. На основе полученных закономерностей разработаны рекомендации по выбору режимов электроимпульсной обработки, позволяющие повысить пластичность медных и алюминиевых проволок при деформации, снизить необходимые усилия, что открывает перспективы для создания энергосберегающих технологий обработки металлов давлением.

Достоверность результатов обеспечивалась применением аттестованного измерительного оборудования: осциллографа, мультиметра и часового микрометра. Все эксперименты проводились с контролем повторяемости; для каждой серии измерений оценивалась случайная и систематическая погрешность, результаты усреднялись. Механические испытания выполнены с целью построения диаграмм растяжения исследуемых образцов; анализ микроструктуры проводился на аттестованном растровом электронном микроскопе. Температура образцов в ходе эксперимента контролировалась с высокой точностью за счет специально разработанной экспериментальной установки. Полученные результаты не противоречат опубликованным в литературе данным и общезначимым принципам.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оригинальная экспериментальная методика, основанная на точном измерении температуры по тепловому расширению проволоочного образца достаточно большой длины при нагружении мертвым грузом, обеспечивает надежный контроль джоулевого разогрева при варьировании плотности и длительности импульсного тока, что позволяет разделять тепловой и нетепловой вклады в электропластическую деформацию.

2. Разработанная математическая модель системы «образец–груз» описывает динамику проволоочного образца после мгновенного нагрева тепловым импульсом с учетом упруго-пластического поведения материала. Рассчитан вклад динамического нагружения в пластическую деформацию образца.

3. При многократной импульсной обработке первый импульс тока дает максимальный прирост пластической деформации, а каждый последующий – монотонно убывающий, что обусловлено постепенным исчерпанием запаса подвижных дислокаций и их закреплением на структурных препятствиях. Отжиг усиливает электропластический эффект в меди за счет роста зерна и, следовательно, повышения подвижности дислокаций. Примесное дисперсионное упрочнение (сплав 6101) ускоряет затухание электропластического эффекта от импульса к импульсу и требует более высокой плотности тока для достижения электропластической деформации, сопоставимой с наблюдаемой в технически чистых металлах.

4. В меди уменьшение длительности импульса с одновременным повышением плотности тока при одинаковом нормированном приросте температуры $\Delta T/T_m$ систематически повышает суммарную пластическую деформацию, что связано с более быстрым прогревом ядер дислокаций током большей плотности и повышением их подвижности. В алюминии наблюдается инверсия влияния длительности импульса: при низких температурах нагрева (15–25 К) более эффективны короткие импульсы с высокой пиковой плотностью тока, а при нагреве

на 35 К большую деформацию дают длительные импульсы, что можно объяснить ростом влияния вышеупомянутых динамических эффектов в системе «образец–груз».

5. Предложена физическая модель дислокационной электропластичности, основанная на балансе между выделением джоулева тепла на ядрах дислокаций и его диссипацией в кристаллическую решетку. Согласно модели, при низкой плотности тока тепло, выделяющееся на дислокациях, успевает диссипировать в решетке, что приводит к росту средней температуры металла без заметной пластической деформации. При высокой плотности тока нагрев дислокаций становится более интенсивным, что повышает их подвижность и способность отрываться от стопоров, тогда как средний по объему нагрев металла остается незначительным, обеспечивая яркое проявление электропластического эффекта.

Апробация работы. Результаты исследований представлены на российских и международных конференциях, таких как: Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы» (г. Уфа, 2024 г.); Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (г. Томск, 2024 г.); LXVII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (АПП-2024) (г. Екатеринбург, 2024 г.); Международная конференция «UUST Nanomaterials Days», посвященная 75-летию профессора, д.ф.-м.н. Р. З. Валиева (г. Уфа, 2025 г.); Международная конференция «Физика и технология перспективных материалов» (г. Уфа, 2025 г.); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая» (г. Кемерово, 2025 г.).

Личный вклад автора работы. В работе над диссертацией автор самостоятельно изучил и обобщил научную литературу по теме исследования, провел экспериментальные исследования и принял непосредственное участие в интерпретации и анализе полученных результатов, формулировке выводов, подготовке научных статей и тезисов докладов к публикации. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат основные результаты, посвященные электропластическому эффекту в меди, алюминии и алюминиевом сплаве, влиянию структурного состояния образцов и параметров тока на электропластический эффект. Автор диссертационного исследования активно участвовал в постановке задач и обсуждении результатов.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 13 статей в журналах, из них 6 в изданиях, входящих в базы данных Web of Science и/или Scopus, а также 7 статей в журналах из перечня ВАК, проиндексированных в РИНЦ.

Финансирование работы. Работа поддержана проектом СТП-3 БЗ программы ПРИОРИТЕТ 2030 Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 142 страницы с 32 рисунками и 9 таблицами. Список литературы содержит 151 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. Описаны теоретическая и практическая значимость работы, личный вклад автора, сведения о публикациях и апробации результатов.

В первой главе приведен обзор литературы по электропластическому эффекту (ЭПЭ) в металлах и сплавах. Рассмотрены история открытия, физические механизмы, влияние параметров импульсного тока, особенности ЭПЭ в ГЦК-металлах (меди и алюминии) и области практического применения.

ЭПЭ был открыт О.А. Троицким в 1960-х годах и с тех пор обнаружен во многих металлах и сплавах. Эффект возникает благодаря сочетанию джоулева нагрева и нетепловых взаимодействий электронов проводимости с дислокациями и проявляется в снижении усилий при деформации, повышении скорости пластической деформации и изменении микроструктуры. В литературе выделяют пять основных физических механизмов ЭПЭ: джоулев нагрев, приводящий к тепловому разупрочнению, сила электронного ветра, открепление дислокаций от препятствий (магнитопластический механизм), изменение энергии активации движения дислокаций и механизм нарушения зарядового баланса на дефектах [7-11]. Относительный вклад каждого механизма зависит от параметров тока и свойств материала. Короткие импульсы с высокой скважностью благоприятствуют нетепловым механизмам, тогда как длительные импульсы или высокая частота повторения усиливают тепловое разупрочнение [7,12]. Кристалл-пластическое моделирование показывает, что наибольший вклад в снижение напряжений дает открепление дислокаций от препятствий [11].

Плотность тока является ключевым параметром: для большинства материалов существует пороговая плотность, выше которой эффект становится значительным [2,7]. Зависимость снижения напряжения от плотности тока близка к линейной при умеренных плотностях [7]. Рекомендуемая длительность импульсов для усиления ЭПЭ составляет 60–100 мкс [13], а частота должна обеспечивать действие тока во всей зоне деформации [13]. Систематические количественные данные о влиянии параметров импульсного тока остаются ограниченными.

В ГЦК-металлах ЭПЭ реализуется через облегчение движения дислокаций и активацию дополнительных систем скольжения. Качественное сходство поведения меди и алюминия при импульсной деформации указывает на общую дислокационную природу эффекта [7,11]. В алюминиевых сплавах обнаружен эффект ретроградной рекристаллизации – возврата к закаленному состоянию под действием импульсов тока [14,15], а также низкоэнергетический ЭПЭ при плотностях тока 0,035–0,1 А/мм² [16]. В меди ЭПЭ ускоряет рекристаллизацию [17,18].

Электротермическая обработка находит широкое применение: при волочении проволоки из нержавеющей стали усилие снижается на 20–50% [4,19]; при прокатке магниевых

сплавов повышается деформируемость [20-22]; глубокая вытяжка сплава AZ31B позволяет достигать индекса Эриксона до 11,7 [23]; импульсный ток снижает силу резания [24].

Несмотря на очевидный прогресс, остаются открытыми вопросы о влиянии длительности и частоты импульсов при контролируемой температуре деформации, о роли границ зерен и примесей в нетепловых механизмах, а также о сравнительном поведении ГЦК-металлов с различной энергией дефекта упаковки в зависимости от структурного состояния.

Проведенный обзор позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы, направленной на экспериментальное исследование влияния параметров импульсного тока и структурного состояния на ЭПЭ в медных и алюминиевых проволоках, а также на выявление роли примесного состава и энергии дефекта упаковки.

Вторая глава описывает материалы, методы исследования и экспериментальную установку. Представлены данные о химическом составе, микроструктуре, механических и физических свойствах исследуемых материалов, а также приведены схема и принцип работы созданной установки для изучения ЭПЭ.

В качестве объектов исследования выбраны медная проволока марки М1 и алюминиевая проволока марки КАС 8176, а также алюминиевый сплав 6101 для изучения влияния примесей. Длина образцов составляла около 500 мм, диаметр – 1 мм для меди и 1,8 мм для алюминия. Рассматривались два структурных состояния: исходное и отожженное (нагрев при 500 °С в течение 2 часов с охлаждением в печи).

Микроструктура исследовалась методом EBSD на растровом электронном микроскопе Tescan Mira 3LMH с программным обеспечением CHANNEL 5.0. Подготовка поверхности включала механическую шлифовку, полировку на алмазной пасте и финишную струйную электрополировку. EBSD-карты снимались с шагом 0,5 мкм для меди и 0,3 мкм для алюминия при ускоряющем напряжении 20 кВ. Границы с разориентацией от 2 до 15° классифицировались как малоугловые, более 15° – как высокоугловые; двойниковые границы обозначались $\Sigma 3$ [25]. Установлено, что в исходной меди средний размер зерна составляет около 9 мкм, доля двойниковых границ достигает 53%. После отжига происходит рекристаллизация и рост зерна до 110-120 мкм. В алюминии двойники практически отсутствуют, а размер зерна увеличивается незначительно (с 7-8 до 12 мкм). Сравнение образцов в различных структурных состояниях позволило разделить влияние размера зерна и плотности дислокаций на электропластический отклик.

Механические испытания на растяжение проводились на машине Schenck Trebel RMC100 при комнатной температуре и скорости деформации $1,1 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Пределы текучести составили: для исходной меди – 125 МПа, для отожженной – 95 МПа; для исходного алюминия – 55 МПа, для отожженного – 45 МПа.

Физические и механические свойства меди и алюминия, соответственно: плотность (8960 и 2700 кг/м³), модуль Юнга ($1,2 \times 10^{11}$ и $0,7 \times 10^{11}$ Н/м²), коэффициент Пуассона (0,33 и 0,33), коэффициент теплового расширения ($1,65 \times 10^{-5}$ и $2,4 \times 10^{-5}$ К⁻¹), удельная теплоемкость (390 и 910 Дж/(кг·К)), температура плавления (1358 и 933 К).

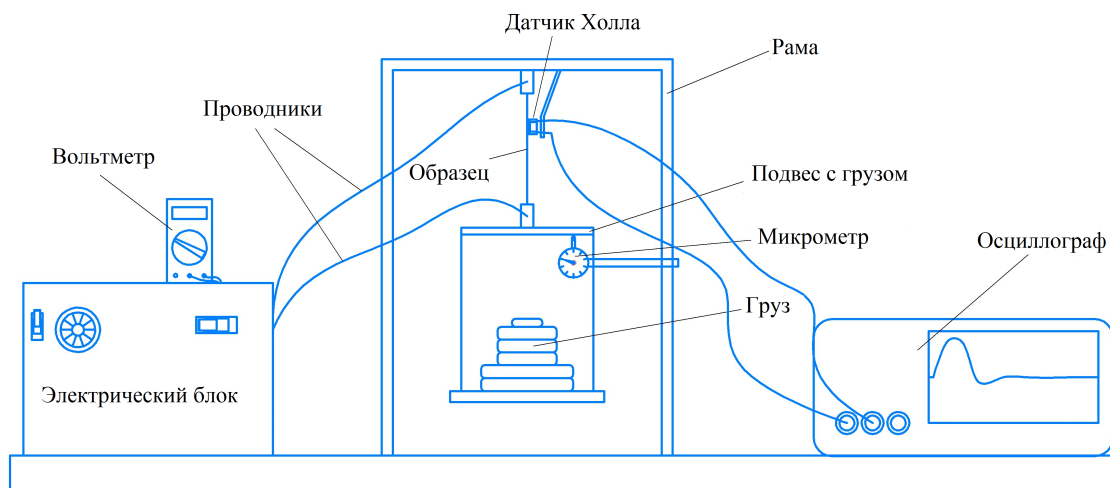


Рисунок 1 — Схема экспериментальной установки для исследования ЭПЭ.

Для изучения влияния импульсного тока разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 1. Проволочный образец нагружается постоянной нагрузкой, создаваемой подвешенным грузом. Электрическая часть включает батарею из 36 конденсаторов (емкость каждого 3,3 мкФ, общая емкость при последовательно-параллельном соединении равна $C = 29,7$ мФ, измеренная емкость составила $C = 25$ мФ). Зарядка осуществляется от регулируемого источника через схему удвоения Латура–Делона–Гренашера. Разряд батареи через образец инициируется выключателем. Ток регистрируется трансформатором тока на ферритовом кольце (140 витков), сигнал подается на осциллограф АКИП-4115/3А. Падение напряжения на образце через делитель подается на второй канал осциллографа. Длительность импульса составляет порядка 0,1–1 мс, максимальная плотность тока достигает 800 А/мм². Методика экспериментов: на образец подается серия из 15 импульсов при фиксированном растягивающем напряжении, после чего нагрузка увеличивается. Интервал между импульсами – не менее 60 с для достижения полного охлаждения образца. Удлинение образца измеряется циферблатным микрометром. В основной серии экспериментов, для меди диапазон напряжений составлял 95,5–171,9 МПа, для алюминия – 34–76 МПа. Напряжение на батарее для меди – 60 В, для алюминия – 75 В, что обеспечивает нагрев на 25 и 17 К соответственно (менее 2% от температуры плавления). Для сплавов КАС 8176 и 6101 использовались разные напряжения (75 и 102 В) из-за разного электросопротивления.

Повышение температуры ΔT определялось по тепловой деформации ε_J с использованием коэффициента теплового расширения α :

$$\Delta T = \frac{\varepsilon_J}{\alpha}.$$

Калибровочные эксперименты показали степенную зависимость $\Delta T \sim U^{2,4}$, где U – напряжение на обкладках конденсатора.

Таким образом, вторая глава содержит полную характеристику материалов и методов, необходимых для экспериментального исследования ЭПЭ и создает основу для представления результатов в последующих главах.

В третьей главе представлено теоретическое исследование динамики системы, состоящей из упруго-пластического проволочного образца и подвешенного груза, после мгновенного теплового импульса, вызванного прохождением электрического тока. Цель моделирования – описание неравновесных процессов при скачкообразном нагреве образца и оценка дополнительной пластической деформации, обусловленной запасенной упругой энергией.

Рассматривается проволочный образец длиной L , с площадью поперечного сечения S , с модулем Юнга E . Верхний конец закреплен, к нижнему подвешен груз массы M . До импульса тока образец нагружен усилием $P = Mg$, создающим напряжение $\sigma = Mg/S$ и деформацию $\varepsilon = Mg/(ES)$. Мгновенный нагрев на ΔT приводит к появлению термических сжимающих напряжений $\sigma_T = -E\alpha\Delta T$. Результирующее напряжение после импульса составляет $\sigma + \sigma_T$.

Показано, что при $\sigma + \sigma_T < 0$ образец переходит в состояние осевого сжатия, что требует анализа устойчивости по Эйлеру. Спектр критических нагрузок для стержня с заделанными концами:

$$P_c = 4EI \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

где $I = \pi d^4/64$ – момент инерции поперечного сечения проволочного образца, m – номер моды выпучивания. Для использованных образцов критические нагрузки составляют единицы ньютонов, поэтому даже небольшое сжимающее напряжение способно вызвать поперечный изгиб. В экспериментах такие режимы исключались выбором параметров, гарантирующих $\sigma + \sigma_T > 0$.

Основное внимание уделено случаю $\sigma + \sigma_T > 0$, когда образец после прохождения импульса тока остается растянутым, но внутренние напряжения перестают уравнивать вес груза, что приводит к динамическому отклику. Разработана конечно-разностная модель стержня, разбитого на N сегментов длиной $l = L/N$. Перемещения узлов $u_n(t)$ подчиняются системе уравнений, полученной из гамильтониана. При $M \gg \rho SL$ образец деформируется однородно, и система сводится к одному уравнению:

$$M\ddot{u} + \frac{E'S}{L}u = Mg, \quad (2)$$

где $E' = d\sigma/d\varepsilon$ – касательный модуль, зависящий от истории нагружения.

Численное интегрирование методом Штормера [26] показало, что при мгновенном нагреве амплитуда напряжений растет линейно с ΔT и может вдвое превышать равновесное значение. Сравнение нелинейно-упругого и упруго-пластического образцов при одинаковых M и ΔT выявило ключевой результат: упруго-пластический образец демонстрирует существенно большую пластическую деформацию. Например, для меди при $M = 10$ кг и $\Delta T = 40$ К прирост деформации в упруго-пластическом случае составляет 0,0044, что более чем в шесть раз превышает прирост в нелинейно-упругом случае (0,0007). Это объясняется запа-

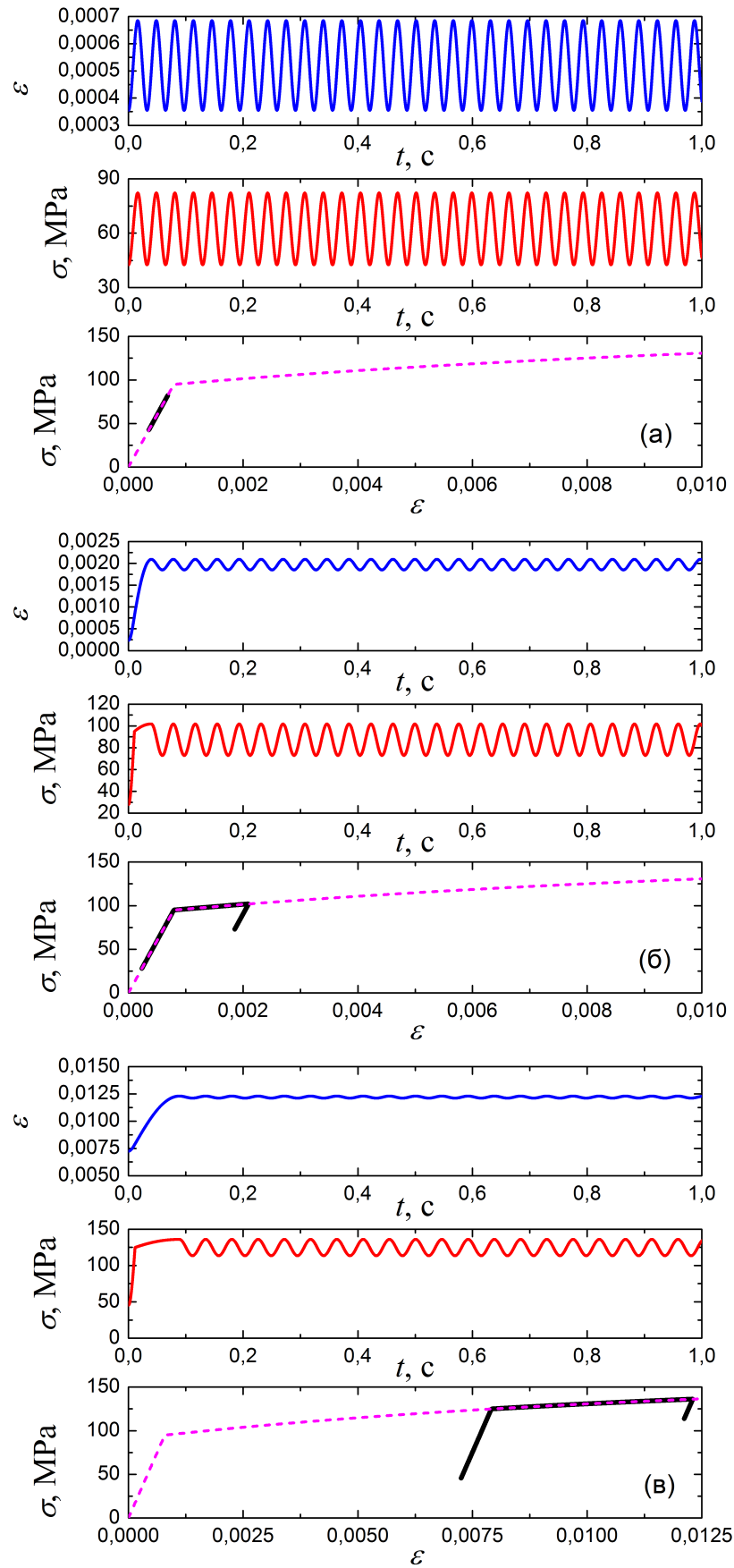


Рисунок 2 — Поведение медного упруго-пластического образца при различных параметрах:

(а) $M = 5$ кг, $\Delta T = 10$ К; (б) $M = 7$ кг, $\Delta T = 30$ К; (в) $M = 10$ кг, $\Delta T = 40$ К.

сенной упругой энергией при разгрузке: тепловое расширение создает деформацию $\alpha\Delta T$, и плотность энергии упругой деформации равна $E(\alpha\Delta T)^2/2$ для упруго-пластического стержня и $E'(\alpha\Delta T)^2/2$ для нелинейно-упругого. Поскольку $E' \ll E$ в пластической области, запас энергии в упруго-пластическом стержне оказывается намного больше.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования системы «образец–груз» для трех наборов параметров: (а) $M = 5$ кг, $\Delta T = 10$ К; (б) $M = 7$ кг, $\Delta T = 30$ К; (в) $M = 10$ кг, $\Delta T = 40$ К. На верхней и средней панелях каждого рисунка показаны изменения во времени деформации ϵ и растягивающего напряжения σ в медном образце длиной 500 мм и диаметром 1 мм. На нижней панели пунктиром показана диаграмма растяжения меди, а черной кривой – изменение напряженно-деформированного состояния образца после прохождения импульса тока. На (а) образец остается в упругой области, на (б) образец, нагруженный в упругой области, после прохождения импульса тока выходит в пластическую область, на (в) образец до пропускания импульса тока уже находился в пластической области. Отметим, что разгрузка происходит по линейному закону с модулем упругости E , а активное нагружение следует диаграмме растяжения. Важно отметить, что уравнение (2) не включает членов, отвечающих электропластической деформации, тем не менее, на (б) и (в) отмечается прирост пластической деформации. Очевидно, что эта деформация обусловлена динамическим эффектом нагружения образца и не связана непосредственно с собственно электропластическим механизмом.

Таким образом, теоретическая модель предсказывает, что дополнительная пластическая деформация от мгновенного теплового импульса может быть значительно усилена за счет упругой энергии, накопленной при разгрузке. Этот эффект особенно важен при интерпретации экспериментальных результатов, когда нагрев происходит в условиях, близких к пределу текучести. Полученные выводы использованы при анализе экспериментальных данных последующих глав.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментального исследования влияния структурного состояния и примесного состава на ЭПЭ в проволоках из меди М1, алюминия КАС 8176 и алюминиевого сплава 6101. Эксперименты проводились на описанной выше установке при напряжении на конденсаторной батарее 60 В для меди и 75 В для алюминия, что дает нагрев образцов на $\Delta T \approx 25$ К для меди и 17 К для алюминия. Такой нагрев, отнесенный к температуре плавления, является одинаковым для меди и алюминия.

Для медных и алюминиевых образцов измерялась зависимость повышения температуры от напряжения на конденсаторе U . Поскольку энергия заряда конденсатора пропорциональна U^2 , можно было ожидать, что джоулев нагрев образцов будет также пропорционален квадрату напряжения, но измерения дали зависимость $\Delta T \sim U^{2,4}$, что объясняется ростом электрического сопротивления проволоки с температурой. Отожженные образцы с меньшей плотностью границ зерен нагреваются сильнее при том же напряжении. Для меди разница в нагреве между исходным и отожженным состояниями выражена сильнее, чем для алюминия, что коррелирует с различиями в изменении размера зерна.

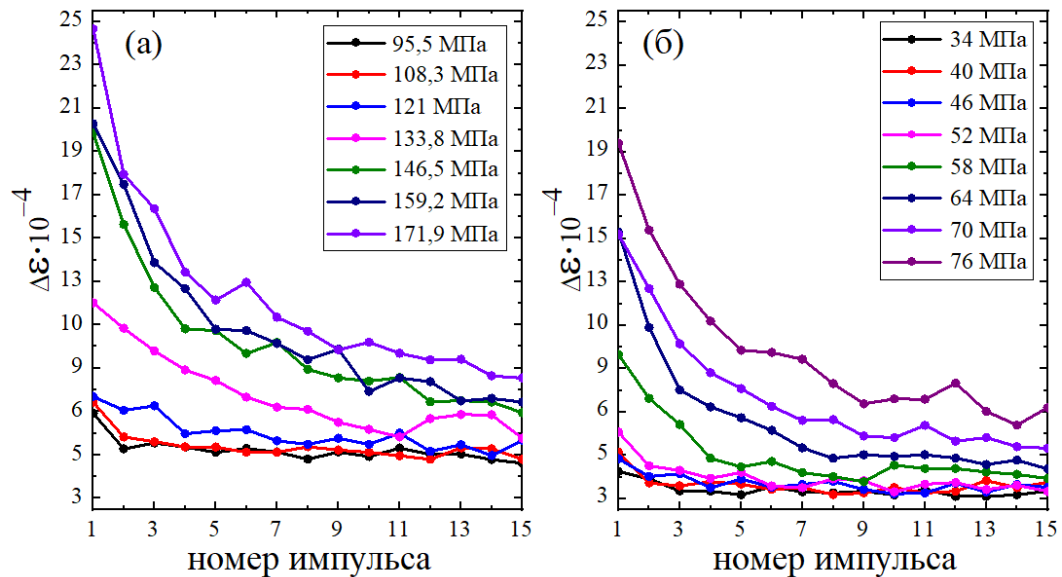


Рисунок 3 — Прирост пластической деформации в зависимости от номера импульса тока при различных значениях фиксированного растягивающего напряжения. Для каждого растягивающего напряжения применяется пятнадцать импульсов тока, после чего нагрузка увеличивается. Результаты для (а) медных и (б) алюминиевых образцов в исходном состоянии. Каждая точка является средним значением по трем экспериментам.

Напряжение конденсаторной батареи – 60 В для меди и 75 В для алюминия.

Изучены скорости охлаждения образцов после импульса тока. Охлаждение происходит экспоненциально со временем и практически не зависит от структурного состояния. Для меди снижение температуры до $\Delta T = 10$ К занимает 20–45 с, для алюминия – до 50 с, что обусловлено большим диаметром алюминиевой проволоки. При высоких растягивающих напряжениях (191 МПа для меди, 80 МПа для алюминия) после импульса тока наблюдается ползучесть, продолжающаяся даже после полного охлаждения. Ползучесть отоженных образцов прекращается быстрее из-за меньшей плотности дислокаций.

Основная серия экспериментов заключалась в пропускании 15 последовательных импульсов тока при фиксированном растягивающем напряжении с последующим его повышением, см. рисунок 3. Диапазон растягивающих напряжений составлял 95,5–171,9 МПа для меди и 34–76 МПа для алюминия, охватывая упругую и пластическую области. Установлено, что при напряжениях ниже предела текучести импульсы тока не вызывают остаточной деформации. При напряжениях выше предела текучести наблюдается ЭПЭ: первый импульс дает максимальный прирост пластической деформации, а с каждым последующим импульсом приращение пластической деформации монотонно уменьшается. Это объясняется тем, что джоулево тепло повышает подвижность дислокаций, которые затем достигают препятствий (границ зерен, дислокационных скоплений) и закрепляются, уменьшая плотность подвижных дислокаций. Увеличение растягивающего напряжения приводит к возобновлению ЭПЭ.

Качественно поведение меди и алюминия одинаково, несмотря на различие в энергии дефекта упаковки, что подтверждает дислокационную природу ЭПЭ и малый вклад двойниковых границ, имеющих в меди, в электропластическую деформацию. Количественные различия связаны с микроструктурой. В отожженной меди с крупным зерном (110–120 мкм) и низкой плотностью дислокаций эффект ЭПЭ выражен сильнее (больше абсолютный прирост деформации), но затухает быстрее. В алюминии, где размер зерна после отжига меняется незначительно (с 7–8 до 12 мкм), отжиг не приводит к заметному изменению электропластического отклика. Это указывает на важную роль границ зерен как стопоров дислокаций.

Исследовано влияние примесного состава на примере алюминия КАС 8176 (0,65% примесных элементов, дислокационное упрочнение) и сплава 6101 (2,39% Mg и Si, твердорастворное упрочнение, переходящее в дисперсионное упрочнение по мере роста частиц). Предел текучести сплава 6101 составляет 90 МПа против 55 МПа для КАС 8176. Для достижения сопоставимого нагрева, отнесенного к температуре плавления (17 К для КАС 8176 и 25 К для 6101), потребовалось разное напряжение на конденсаторе: 75 В и 102 В соответственно. Более высокое напряжение для сплава 6101 объясняется тем, что электроны эффективно рассеиваются не только на дислокациях, но и на атомах примесей, поэтому для одинакового воздействия на дислокации требуется большая запасенная энергия.

При пропускании 15 импульсов через образцы сплава 6101 при растягивающих напряжениях 110–189 МПа обнаружено, что ЭПЭ затухает значительно быстрее (практически после второго импульса), чем в КАС 8176. Это объясняется тем, что под действием импульсов тока атомы примесей (Mg, Si) могут собираться в кластеры и затем в частицы, которые являются более сильными препятствиями для дислокаций, чем атомы в твердом растворе. Таким образом, дисперсионное упрочнение ускоряет затухание ЭПЭ от импульса к импульсу и требует повышенных энергозатрат для достижения эффекта.

В заключение главы показано, что ЭПЭ может быть использован как энергосберегающий метод обработки металлов давлением, поскольку джоулево тепло, особенно в технически чистых металлах, выделяется преимущественно на дислокациях, стимулируя пластическую деформацию без значительного объемного нагрева.

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования влияния параметров импульсного тока (длительность импульса и плотность тока) на ЭПЭ в медной проволоке марки М1 и алюминиевой проволоке марки КАС 8176. Для изменения длительности импульса использовались конденсаторы разной емкости: $C_1 = 25$ мФ и $C_2 = C_1/6 = 4,2$ мФ. Разряд конденсаторов через образец ($R \approx 10$ мОм) соответствует отклику RLC-цепи; измеренная длительность импульса составила $\tau_1 = 1,35$ мс для C_1 и $\tau_2 = 0,6$ мс для C_2 , что согласуется с теоретической зависимостью $\tau \sim \sqrt{LC}$.

Для корректного сравнения меди и алюминия выбраны три уровня нагрева, соответствующие одинаковым значениям $\Delta T/T_m$: для алюминия $\Delta T_{Al} = 15, 25, 35$ К; и для меди $\Delta T_{Cu} = 22, 36, 51$ К. Последовательно прикладывались 15 импульсов при фиксированном растягивающем напряжении с последующим его повышением. Для меди изучен диапазон

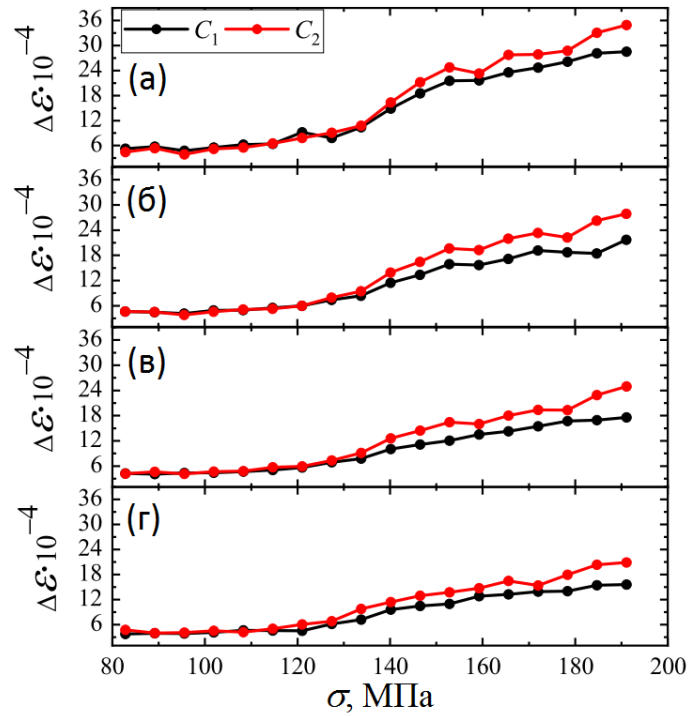


Рисунок 4 — Увеличение относительной деформации медного образца в зависимости от растягивающего напряжения для (а) первого, (б) второго, (в) третьего и (г) четвертого последовательных импульсов тока для емкостей конденсаторной батареи C_1 (черные кривые) и $C_2 = C_1/6$ (красные кривые). Представленные результаты являются средним значением по трем независимым экспериментам.

34–54 МПа с шагом 4 МПа, для алюминия 56–80 МПа с шагом 6 МПа; эксперименты проведены для обеих емкостей и трех уровней нагрева.

Для меди при одинаковом нагреве короткие импульсы дают систематически более высокий прирост деформации, что указывает на нетепловой вклад, связанный с длительностью воздействия тока. При максимальных параметрах (54 МПа, 51 К) образец разрушался после третьего импульса.

Для алюминия картина качественно аналогична, однако выявлена нетривиальная зависимость влияния емкости от нагрева. При $\Delta T = 15$ К суммарная деформация больше при емкости C_2 ; при $\Delta T = 25$ К различие сглаживается; при $\Delta T = 35$ К наблюдается инверсия – C_1 эффективнее C_2 . Это объясняется влиянием динамического нагружения, которое обсуждалось в третьей главе.

Суммарная деформация за 15 импульсов подтверждает эти закономерности: для медных образцов короткие импульсы тока при емкости C_2 дают большую суммарную деформацию во всем диапазоне; для алюминия при 15 К выше C_2 , при 25 К различия сглаживаются, при 35 К преимущество переходит к C_1 .

Еще одна серия экспериментов была проведена с постепенным увеличением растягивающего напряжения в диапазоне 81–192 МПа с шагом 6,53 МПа. На каждом уровне напряжения подавались четыре последовательных импульса тока. На рисунке 4 показана относительная деформация образца в зависимости от растягивающего напряжения. Панели (а)–(г) показы-

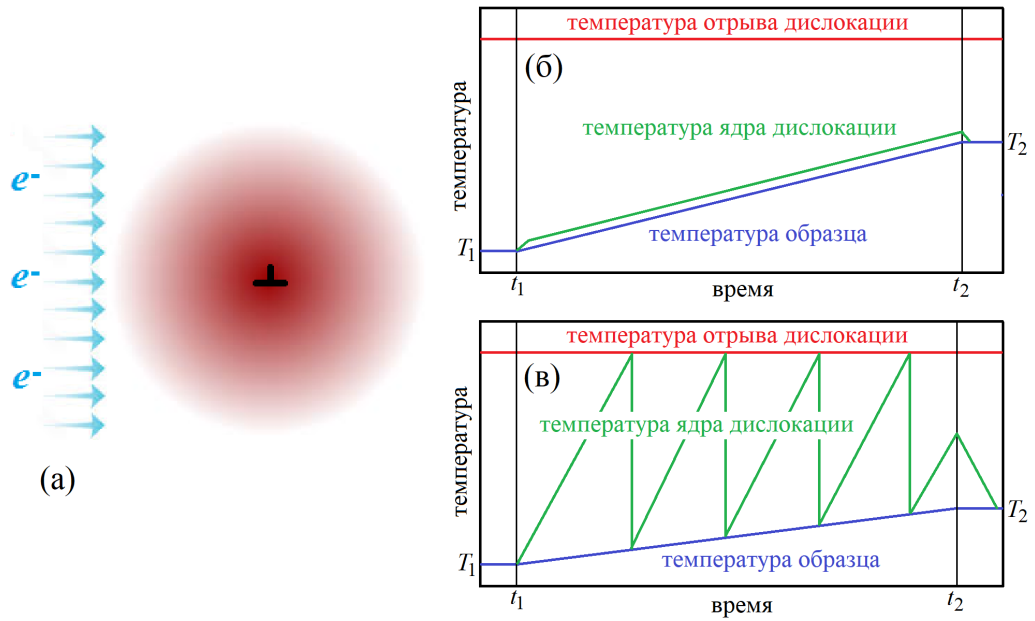


Рисунок 5 — (а) – Схематическое представление джоулева тепла, выделяемого в ядре дислокации и передаваемого в кристаллическую решетку посредством теплопроводности.

Более насыщенный красный цвет указывает на более высокую температуру. (б,в) – Схематическое изображение временной эволюции средней по объему температуры образца (синяя линия) и температуры ядра дислокации (зеленая линия) при воздействии импульса тока, начинающегося и заканчивающегося в моменты времени t_1 и t_2 . Красная горизонтальная линия показывает температуру, при которой дислокация открепляется от стопоров. На (б) показан случай чистого металла с баллистической теплопроводностью, а на (в) – случай твердого раствора с диффузионной теплопроводностью.

вают результаты для первого, второго, третьего и четвертого импульсов тока соответственно. Черные и красные линии показывают деформацию проволоки для емкостей конденсатора C_1 и $C_2 = C_1/6$ соответственно. Конденсаторы заряжались до напряжения $U_1 = 60$ В и $U_2 = 190$ В, что обеспечивало одинаковый джоулев нагрев образцов на $\Delta T = 25$ К. Итак, черные кривые показывают результаты для более длинного импульса с меньшей плотностью тока, а красные кривые – для более короткого импульса с большей плотностью тока. Очевидно, что электропластическая деформация выше во втором случае. Следовательно, более короткие импульсы тока с высокой плотностью тока вызывают большую электропластическую деформацию, чем длинные импульсы с низкой плотностью тока при одинаковом выделении джоулева тепла.

На основе полученных экспериментальных данных разработана физическая модель дислокационной электропластичности, схематически представленная на рисунке 5. Согласно модели, ключевую роль играет баланс между выделением джоулева тепла на ядрах дислокаций и его диссипацией в кристаллическую решетку за счет теплопроводности. При низкой плотности тока тепло, выделяющееся на дислокациях, успевает диссипировать в решетку, что приводит к росту средней температуры металла без заметной пластической деформации. Более высокая плотность тока обеспечивает более интенсивный нагрев дислокаций, повышая

их подвижность и способность отрываться от стопоров, при этом средний по объему нагрев металла остается незначительным. Наличие примесных атомов замедляет теплоперенос от нагретых дислокаций в решетку, что способствует более эффективному нагреву дислокаций и, следовательно, усилению ЭПЭ. Модель объясняет пороговый характер ЭПЭ, инверсию влияния длительности импульса в алюминии, уменьшение прироста деформации от импульса к импульсу, а также роль примесей и структурного состояния.

Полученные результаты подчеркивают необходимость индивидуального подбора параметров электропластической обработки (плотности тока и длительности импульса) для каждого материала с учетом его физико-механических свойств и температурных условий деформирования. Выявленные закономерности могут быть использованы при разработке технологических режимов импульсной обработки металлов.

Заключение:

В диссертационной работе проведено комплексное экспериментальное и теоретическое исследование влияния параметров импульсного тока на ЭПЭ в медных и алюминиевых проволоках с различным структурным состоянием. На основании полученных результатов сформулированы следующие основные выводы.

1. Разработка экспериментальной методики с контролем нормированного нагрева. Разработана и собрана экспериментальная установка для исследования электропластической деформации проволочных образцов при растяжении, позволяющая варьировать емкость конденсаторной батареи (до 25 мФ) и напряжение на обкладках (до 400 В). Показано, что для медных и алюминиевых образцов повышение температуры за счет выделения джоулева тепла от импульса тока следует зависимости $\Delta T \sim U^{2,4}$, где U – напряжение на конденсаторе. Предложена методика нормировки прироста температуры на температуру плавления, $\Delta T/T_m$, обеспечивающая корректное сравнение электропластического отклика разных материалов.

2. Моделирование динамики системы «образец–груз». Разработана и изучена физико-механическая модель системы «образец–груз», описывающая осцилляции деформаций после мгновенного нагрева импульсом тока. Показано, что запасенная упругая энергия при разгрузке дает вклад в прирост пластической деформации образца, не связанный с ЭПЭ. Теоретические результаты использованы при интерпретации экспериментальных данных.

3. Влияние микроструктуры на электропластический отклик. Полученные результаты согласуются с дислокационной природой ЭПЭ: первый импульс тока дает максимальный прирост пластической деформации, а с каждым последующим импульсом приращение монотонно убывает, что может быть объяснено постепенным исчерпанием запаса подвижных дислокаций и их закреплением на структурных препятствиях. Показано, что отжиг, приводящий к увеличению размера зерна, усиливает ЭПЭ в меди за счет повышения подвижности дислокаций, но не влияет на алюминий, где размер зерна при отжиге изменился незначительно.

4. Влияние примесного состава и дисперсионного упрочнения на ЭПЭ. На примере алюминиевого сплава 6101 (с суммарным содержанием 2,39% Mg и Si в твердом

растворе) установлено, что дисперсионное упрочнение ускоряет затухание ЭПЭ от импульса к импульсу и требует повышенного напряжения на конденсаторе для достижения прироста деформации, сопоставимого с тем, что наблюдается для технически чистых металлов. Эффект объясняется более быстрым нагревом сплава за счет рассеяния электронов на примесных атомах и ростом частиц под действием импульсного тока, что создает более сильные стопоры для дислокаций.

5. Систематическое сравнение влияния длительности импульса и плотности тока при контролируемом нагреве. Впервые проведено систематическое сравнение влияния длительности импульса и плотности тока в импульсе при сохранении среднего по объему джоулева разогрева, на ЭПЭ в образцах из меди и алюминия. Для медных образцов уменьшение длительности импульса и увеличение плотности тока при одинаковом нагреве, как правило, повышает суммарную деформацию, что свидетельствует о росте нетеплового вклада в ЭПЭ. Для алюминия обнаружена инверсия влияния длительности: при незначительном джоулевом нагреве ($\Delta T = 15\text{--}25\text{ K}$) эффективнее короткие импульсы (высокая пиковая плотность тока), а при нагреве до 35 K преимущество переходит к длительным импульсам, что объясняется нетривиальным влиянием динамического нагружения образцов при мгновенном нагреве импульсом тока.

6. Разработанная физическая модель дислокационной электропластичности, учитывающая баланс между выделением джоулева тепла на ядрах дислокаций и его диссипацией в решетку за счет теплопроводности, объясняет основные экспериментальные результаты работы, включая усиление ЭПЭ с повышением плотности тока в импульсе и снижение прироста пластической деформации от импульса к импульсу.

7. Рекомендации по выбору режимов электроимпульсного воздействия. На основе установленных закономерностей рекомендуется выбирать режимы электроимпульсной обработки с учетом структурного состояния и примесного состава материала. Для меди, особенно после отжига, сопровождающегося укрупнением зерна, наиболее эффективны короткие импульсы с повышенной пиковой плотностью тока. Для технически чистого алюминия оптимальная длительность импульса зависит от уровня джоулева нагрева: при низких относительных температурах (до 25 K) эффективнее короткие импульсы, а при более высоких (35 K) — длительные; отжиг алюминия существенного влияния на эффект не оказывает. Для алюминиевых сплавов, упрочненных примесями и дисперсными частицами, требуется увеличение плотности тока и ограничение числа последовательных импульсов вследствие ускоренного затухания электропластического эффекта. Обработку целесообразно проводить при напряжениях, близких к пределу текучести, обеспечивая контролируемый джоулев нагрев и высокую скважность импульсов.

8. Перспективы дальнейших исследований. В работе выявлены новые направления для углубленного изучения: необходимо провести систематические исследования влияния частоты следования импульсов и скважности на ЭПЭ; расширить спектр материалов (высокоэнтропийные сплавы, композиты); изучить влияние электропластической обработки на усталостные характеристики и коррозионную стойкость; разработать физически обосно-

ванные модели, учитывающие совместное действие тепловых и нетепловых механизмов на мезо- и наноуровне. Полученные в диссертации результаты вносят вклад в понимание физики ЭПЭ и могут служить основой для создания технологических регламентов импульсной обработки проволочных изделий.

Список литературы

1. Stolyarov V., Calliari I., Gennari C. Features of the interaction of plastic deformation and pulse current in various materials (2021) *Materials Letters*, 299, pp. 130049.
2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals (1978) *Scripta Metallurgica*, 12 (11), pp. 1063 - 1068.
3. Li X., Lin Y., Wu M., Chen L., Liu L., Song G. Electrically assisted processing of metallic materials: Coupled mechanisms, microstructure evolution, and service performance (2026) *Metals*, 16 (6), pp. 578.
4. Tang G., Zheng M., Zhu Y., Zhang J., Fang W., Li Q. The application of the electro-plastic technique in the cold-drawing of steel wires (1998) *Journal of Materials Processing Technology*, 84 (1-3), pp. 268 - 270.
5. Stolyarov V., Misochenko A. A pulsed current application to the deformation processing of materials (2023) *Materials*, 16 (18), pp. 6270.
6. Abdullina D.U., Kuzkin V.A., Krivtsov A.M., Kudreyko A.A., Dmitriev S.V. Heat transfer regimes and the electroplasticity effect: A molecular dynamics study (2025) *Physical Review B*, 112 (14), 144310.
7. Dimitrov N., Liu Y., Horstemeyer M. Electroplasticity: A review of mechanisms in electro-mechanical coupling of ductile metals (2020) *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29 (5), pp. 1-12.
8. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals (1995) *Physical Review B*, 52 (22), pp. 15829.
9. Li D.L., Yu E.L., Liu Z.T. Mechanism Research and Progress of Metal's Pure Electroplastic Effect (2012) *Applied Mechanics and Materials*, 184-185, pp. 1060-1063.
10. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K., Jo J., Heo T., Hong S.-T., Cho S., Kwon Y.-K., Choi I.-S., Kim M., Han H. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials (2020) *Applied Materials Today*, 21, pp. 100874.
11. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the mechanisms of electroplasticity from a crystal plasticity perspective (2019) *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 27(8), pp. 085006.
12. Ruszkiewicz B., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J. A Review of Electrically-Assisted Manufacturing With Emphasis on Modeling and Understanding of the Electroplastic Effect (2017) *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(11), pp. 110801.
13. Li D.L., Yu E.L., Liu Z.T. Research on Electroplastic Drawing Technology and Equipment (2010) *Advanced Materials Research*, 139-141, pp. 239-242.

14. Wang Y.J., Zhang K., Wu W.C., Wang W., Wang J.B. Effect of electrical pulse treatment on the retrogression and re-aging behavior of 6061 aluminum alloy (2017) *Materials Science and Engineering: A*, 703, pp. 559-566.
15. Wu W.C., Wang Y.J., Wang J.B., Wei S.M. Effect of electrical pulse on the precipitates and material strength of 2024 aluminum alloy (2014) *Materials Science and Engineering: A*, 608, pp. 190-198.
16. Bumgardner C.H., Croom B.P., Song N., Zhang Y., Li X. Low energy electroplasticity in aluminum alloys (2020) *Materials Science and Engineering: A*, 798, pp. 140235.
17. Conrad H., Karam N., Mannan S. Effect of prior cold work on the influence of electric current pulses on the recrystallization of copper (1984) *Scripta Metallurgica*, 18(3), pp. 275-280.
18. Konkova T., Valeev I., Mironov S., Korznikov A., Myshlyaev M., Semiatin S.L. Effect of electric-current pulses on grain-structure evolution in cryogenically rolled copper (2014) *Journal of Materials Research*, 29, pp. 2727-2737.
19. Tang G.Y., Zhang J., Zheng M.X., Zhang J., Fang W., Li Q. Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L (2000) *Materials Science and Engineering: A*, 281, pp. 263-267.
20. Li X.P., Wang F., Li X.H., Tang G.Y., Zhu J. Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling (2014) *Materials Science and Engineering A*, 618, pp. 500-504.
21. Kuang J., Li X.H., Zhang R.K., Ye Y.D., Luo A.A., Tang G.Y. Enhanced rollability of Mg3Al1Zn alloy by pulsed electric current: a comparative study (2016) *Materials & Design*, 100, pp. 204-216.
22. Sun S., Tang G.Y. Influence of Thermo-Electropulsing Rolling Process on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Strip (2013) *Advanced Materials Research*, 744, pp. 375-378.
23. Song J.H., Choi S., Kang M.J., Kim D., Lee M.-G., Lim C.Y. Pulse current assisted drawability of AZ31B magnesium alloy sheets (2016) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 159, pp. 012003.
24. Sánchez Egea A.J., Rojas H.A., Montilla Montaña C.A., Kallewaard Echeverri V. Effect of electroplastic cutting on the manufacturing process and surface properties (2015) *Journal of Materials Processing Technology*, 222, pp. 327-334.
25. Humphreys F.J. Review: Grain and subgrain characterisation by electron backscatter diffraction (2001) *J. Mat. Sci.*, 36, pp. 3833-3854.
26. Bakhvalov N.S. Numerical methods: analysis, algebra, ordinary differential equations (1977) Moscow: MIR Publishers.

Публикации автора по электроимпульсной обработке металлов и сплавов

Публикации, проиндексированные в Scopus и/или Web of Science

1. Morkina A.Y., Tarov D.V., Khalikova G.R., Semenov A.S., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum

(2024) Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 22 (4), pp. 615 - 632. DOI: 10.22190/fume240920049m (**Q1**)

2. Kazakov A.M., Korznikova E.A., **Morkina A.Y.**, Tarov D.V., Kuzkin V.A., Dmitriev S.V. Thermal conductivity of aluminum alloy with Mg or Si addition (2026) Physics Letters A, 582, pp. 131576. DOI: 10.1016/j.physleta.2026.131576 (**Q2**)

3. **Morkina A.Y.**, Tarov D.V., Tatarinov P.S., Bebikhov Y.V., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Electric pulse treatment of Grade 5 titanium alloy plates after bending to reduce springback effect (2025) Mechanics of Solids, 60 (3), pp. 2344 - 2352. DOI: 10.1134/S0025654425601971 (**Q3**)

4. **Morkina A.Y.**, Tarov D.V., Korznikova E.A., Khazimullin M.V., Semenova M.N., Tatarinov P.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. Effect of current pulse parameters on the electroplasticity of tensioned copper wires (2026) European Journal of Mechanics, A/Solids, 118, pp. 106078. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2026.106078 (**Q1**)

5. **Morkina A.Y.**, Tarov D.V., Yakushev I.A., Tatarinov P.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Effect of electroplasticity studied for aluminum wires under tension (2024) Procedia Structural Integrity, 65, pp. 158 - 162. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.11.025

6. Dmitriev S.V., Semenova M.N., Bebikhov Yu.V., Tatarinov P.S., Abdullina D.U., **Morkina A.Y.**, Korznikova E.A. Dynamics of the sample-weight system in an experimental setup for studying the electroplasticity effect. (2026) Mechanics of Solids, 61, pp. 141. DOI: 10.1134/S0025654426601631 (**Q3**)

Публикации из перечня ВАК, проиндексированные в РИНЦ

7. Сугоняко И.С., Бабичева Р.И., **Моркина А.Ю.**, Таров Д.В., Дмитриев С.В. Моделирование движения краевых дислокаций в алюминии при высоких сдвигающих напряжениях методом молекулярной динамики. Физика твердого тела. 2025. Т. 67. № 8. С. 1411-1418.

8. **Моркина А.Ю.**, Таров Д.В., Наумова Д.М., Татаринов П.С., Татаринов В.П., Семенов А.С., Якушев И.А., Дмитриев С.В. Влияние повторяющихся импульсов тока высокой плотности на пластическую деформацию медных проводов. Известия Уфимского научного центра РАН. 2024. № 3. С. 15-23.

9. Брызгалов В.А., **Моркина А.Ю.**, Абдуллина Д.У., Семенов А.С., Татаринов П.С., Якушев И.А., Бебихов Ю.В., Кукуджанов К.В., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Обзор исследований по заживлению макротрещин в металлах под действием импульсного тока высокой плотности. Materials. Technologies. Design. 2024. Т. 6. № 2 (17). С. 38-58.

10. Шепелев И., Габдуллахатов А., **Моркина А.**, Сугоняко И., Корзникова Е., Черников Д., Брызгалов В., Семенов А., Дмитриев С. Индукторы для наведения токов Фуко в металлах с целью модификации их структуры и свойств. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23. № 2. С. 189-200.

11. Сугоняко И., **Моркина А.**, Таров Д., Татаринов П., Бебихов Ю., Семенов А., Корзникова Е., Дмитриев С. Обзор последних работ по электроимпульсной обработке сталей с целью улучшения их свойств. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22. № 3. С. 342-358.

12. **Моркина А.**, Таров Д., Лутфуллин Р., Татаринцов П., Бебихов Ю., Семенов А., Корзникова Е., Дмитриев С. Обработка импульсным током пластин титанового сплава ВТ6 после гибки для ослабления пружинения. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2025. Т. 22. № 3. С. 324–334.

13. Татаринцов П.С., Татаринцов В.П., Сугоняко И.С., **Моркина А.Ю.**, Хазимуллин М.В., Таров Д.В., Корзникова Е.А., Якушев И.А., Дмитриев С.В. Автоматизированная лабораторная установка для разработки методов электроимпульсной обработки металлов. *Известия Алтайского государственного университета*. 2026. Т. 1. № 147. С. 56–62.