

На правах рукописи



Магазинов Сергей Геннадьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО
ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.04.13 — Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург— 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Кривошеев Сергей Иванович
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»,
г. Санкт-Петербург

Официальные оппоненты: **Фридман Борис Эммануилович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»,
главный научный сотрудник лаборатории источников импульсного, г. Санкт-Петербург

Пинчук Михаил Эрнестович
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук» заведующий лабораторией «Диагностики плазмы», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «01» октября 2019 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главный учебный корпус, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого». и на сайте <https://www.spbstu.ru> <http://www.spbstu.ru/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета



А.С. Резник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационного исследования

Характерная для сильных импульсных магнитных полей высокая плотность энергии обуславливает их широкое применение при решении различных технологических задач, например магнитноимпульсная штамповка, магнитноимпульсная сварка и др., и в проведении различных физических экспериментов, связанных с исследованием материалов при высокоинтенсивных энергетических воздействиях.

Одним из таких приложений является магнитноимпульсный способ формирования управляемых импульсов давления, использование которого в задачах исследования импульсного нагружения хрупких диэлектрических материалов позволило выявить характерные особенности процесса хрупкого разрушения при нагружении импульсами давления микросекундной длительности. Высокая адаптивность метода к различным схемам нагружения, используемым для исследования материалов под действием таких импульсов, делает привлекательным применение этого метода для исследования поведения проводящих материалов.

Определяющим для анализа результатов испытания материалов является не только знание о его параметрах в статических условиях, но и информация о параметрах импульсного воздействия, приводящего к нарушению формы (деформированию) или разрушению материала. Импульсное давление, формируемое магнитноимпульсным способом, определяемое токораспределением в проводящих элементах и генерируемым магнитным полем, позволяет проблему измерения импульсного давления перевести в задачи выбора геометрии магнитной системы с известным токораспределением и измерения импульсного тока, протекающего в ней.

Многофакторность процессов перехода материала из начального в деформированное или разрушенное состояние требует использования не только различных схем нагружения, но и изучения этого перехода при различных уровнях и длительностях воздействия. Известные способы исследования материалов в условиях высокоскоростного нагружения позволяют проводить исследования материалов, например при использовании откольных схем нагружения, при давлениях до нескольких десятков ГПа длительностью от пикосекунд до микросекунд, формируя при этом режимы деформирования со скоростями 10^5 1/с и более, полученные данные при этом используются для разработки или верификации уравнений состояния материала. Известные методы испытания наряду с положительными свойствами (широкий диапазон генерируемых давлений, повторяемость результатов, отработанные методики измерения и т.д.) имеют некоторые особенности, связанные с трудностью выявления параметров давления в зоне разрушения, традиционно определяемых по скорости перемещения свободной границы образца. Однако при определении импульсной механической прочности, однозначность связи давления в зоне разрушения и скорости свободной границы может иметь место только при упругом режиме деформирования, так как при испытаниях на откол, волне растяжения предшествует волна сжатия, которая в случае

пластичности материала может повлиять на его свойства. Разработка метода исследования при котором высокоскоростное деформирование в зоне максимальных напряжений реализуется непосредственно и только за счет растягивающих усилий позволит расширить понимание процесса деформирования металлов.

Применение магнитноимпульсного способа также позволяет проводить неразрушающую диагностику систем.

Известно, что протекающий по деформируемому металлу электрический ток может приводить к проявлению различных эффектов, влияние которых в зависимости от плотности тока, может приводить к изменению поведения материала. Изменение магнитной системы путём введения в её состав дополнительного элемента в виде испытуемого металлического образца может привести к появлению в нем наведенных токов, что делает актуальным изучение процесса взаимодействия магнитного поля с проводником и выявление возможности снижения или исключения наведенных токов в образце. При этом возможно и исключение такого сильнодействующего фактора, влияющего на деформационные характеристики металла, как температура, обусловленная в случае наличия наведенных токов в образце джоулевым энерговыделением.

Данная тематика соответствует Паспорту специальности 01.04.13 - «Электрофизика, электрофизические установки», а именно пунктам: п. 1. Исследование физических явлений при накоплении и трансформации электромагнитной энергии. Физические процессы формирования и развития электрического разряда в газообразных, жидких, твердых и комбинированных средах. Ударные волны, инициированные разрядом. Технические применения разряда в плотных средах и газе. п. 3. Создание установок для получения сильных и сверхсильных электромагнитных полей на базе сверхпроводящих магнитных систем, соленоидов сверхсильного магнитного поля, магнитной кумуляции. Создание установок для генерации мощных импульсов сверхвысоких частот на основе сильноточных пучков. п. 9. Исследование электрофизических и электромагнитных явлений и процессов в различных средах для нужд электронной, приборостроительной, электротехнической промышленности, средств вычислительной техники и связи.

Целью данной работы является обоснование применимости магнитноимпульсного способа создания управляемых ударных нагрузок для исследования высокоскоростного деформирования проводящих материалов при импульсном воздействии микросекундной длительности.

При этом решались следующие **задачи**:

1. разработка схемы нагружения и анализ особенностей взаимодействия импульсного магнитного поля с проводящими образцами;
2. экспериментальное и численное исследование формирования импульсного давления и влияния неоднородностей в токоведущих элементах на его параметры;
3. экспериментальное исследование проводящих образцов при импульсном нагружении, создаваемом магнитноимпульсным способом.

Научная новизна исследования:

Выявлены особенности диффузии сильного магнитного поля в проводящую среду, границы которой образуют прямой двугранный угол, при направлении тока вдоль и поперек грани проводника.

Проведена оценка влияния неоднородности токораспределения на краях плоских шин на пространственное распределение магнитного давления, которое проявляется на масштабе дефекта, вызвавшего нарушение однородности токораспределения.

Разработаны конфигурации образцов и схемы их нагружения, обеспечивающие формирование заданного напряженного состояния и отсутствие в зоне максимальных напряжений токовой и тепловой нагрузки.

Экспериментально, на примере меди, показана возможность использования магнитоимпульсного способа создания управляемых ударных нагрузок для исследования высокоскоростного деформирования металлов.

Показано, что пропускание импульсного тока в начале высокоскоростного деформирования при плотностях тока на границе образцов амплитудой 35-40 кА/мм², длительностью ~4 мкс, и амплитудой тока 4-5 кА на сечении 5 мм², длительностью 60 мкс не оказывает видимого влияния на остаточную деформацию.

Влияние импульсных магнитных полей с амплитудой до 12 Т на статическую прочность углепластика не выявлено.

Научно-практическая значимость работы заключается в разработке метода деформирования металлов в диапазоне скоростей деформирования 10^3 - 10^5 1/с в условиях прямого растяжения с использованием сильных импульсных магнитных полей, позволяющего при этом исследовать влияние импульсных токов на процесс деформирования.

Получаемые данные могут быть использованы для прояснения особенностей высокоскоростного деформирования и механизмов электропластического эффекта, а также для верификации деформационных моделей, использующихся при практических расчетах конструкций, подверженных ударно-динамическим воздействиям.

Методология и методы исследования:

Математическое моделирование электромагнитного, механического и теплового полей, сопровождающих магнитоимпульсное испытание образцов выполнено численными методами в программных средах Comsol Multiphysics и ANSYS. Экспериментальные испытания проводились на установке ГИТ-50/12, с осциллографированием протекающего тока. На основе сопоставления результатов конечного деформирования образцов и численного моделирования анализировалось поведение материалов. Нагрев нагружающего устройства, выполненного из плоских шин, контролировался по интегралу тока и не достигал критического значения, при котором материал переходит из твёрдого состояния в жидкое или газообразное.

Основные положения, выносимые на защиту:

Показана возможность использования магнитоимпульсного способа создания управляемых импульсных нагрузок микросекундного диапазона длительностей для исследования механических свойств проводящих образцов.

На примере исследования медных образцов показана связь остаточной деформации с параметрами нагружения при скоростях деформирования $\sim 10^3 - 10^4$ 1/с.

Показано, что модель Джонсона-Кука для меди ОФНС при скоростях деформирования от 2000 1/с до 7500 1/с адекватно описывает экспериментальные данные для меди марки М1.

Выявлено, что при импульсном воздействии микросекундной длительности влияние дефекта на формируемое магнитное давление на краю токоведущего элемента (плоских шин) проявляется на масштабе дефекта.

Экспериментально показано, что воздействие в начале деформирования затухающим импульсным током, протекающим по сечению 5 мм², амплитудой плотности тока 30-45 кА/мм² с длительностью 4 мкс и амплитудой тока 4-5 кА, длительностью 60 мкс не влияет на остаточные деформации при высоких скоростях деформирования.

Степень достоверности результатов определяется адекватностью использованных экспериментальных методик, воспроизводимостью экспериментальных данных и непротиворечивостью с представленными в литературе данными. Численное моделирование проводилось с использованием современных программных средств, имеющих интегрированные базы данных по свойствам материалов.

Апробация работы:

Результаты работы были доложены на следующих международных конференциях:

1. Адамьян, Ю.Э. Использование переходных характеристик для диагностики многослойных систем / Ю.Э. Адамьян, А.А. Белов, Е.А. Вырва, К.В. Грешников, Г.П. Жабко, С.И.Кривошеев, И.С. Колодкин, С.Г. Магазинов, Е.Л. Свечников, В.В. Титков. // *International Conference NDT Days 2015 Proceedings*. - Созополь, Болгария. - 15-19 Июнь. - 2015. -С. 387-390.

2. Кривошеев, С.И. Экспериментальное исследование скорости развития трещины при импульсном нагружении / С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов // *труды российского симпозиума «Атомистическое моделирование, теория и эксперимент»* Новый Афон, Абхазия. - 16-27 августа 2015.

3. Кривошеев, С.И. Исследование быстрого деформирования металлов при магнитно-импульсном нагружении микросекундного диапазона / С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов, Д.И. Алексеев // *International Conference NDT Days 2016 Proceedings*. - Созополь, Болгария. - Июнь 06-10, 2016. - С. 369-373.

4. Krivosheev, S.I. Surface fracture energy of pulse action / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov // *XXXI International Conference on Equations of State for Matter*, March. - Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. - 2016. - Pp. 123.

5. Алексеев, Д.И. Магнитно-импульсное тестирование проводящих материалов с макродефектом / Д.И. Алексеев, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов // *Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 2.* - СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. - 2017. С. 5-8.
6. Алексеев, Д.И. Высокоскоростное деформирование проводящих материалов магнитно-импульсным способом / Д.И. Алексеев, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов // *Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады.* – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. - 2017. - С.39-44.
7. Кривошеев, С. И. Особенности магнитоимпульсного способа деформирования проводящих образцов / С.И. Кривошеев, Ю.Э. Адамьян, В.В. Титков, Л.В. Черненькая, Д.И. Алексеев, С.Г. Магазинов // *Bulgarian Society for NDT, International Journal “NDT Days”.* - Vol. 1, Is. 3. - 2018. - С. 375.
8. Адамьян, Ю. Э. Некоторые особенности влияния увеличения локальной плотности тока на разрушение плоских проводников / Ю. Э. Адамьян, Д.И. Алексеев, Л.В. Черненькая, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов, В.В. Титков. // *Bulgarian Society for NDT, International Journal “NDT Days”* Vol. 1, Is. 3. - 2018. - С. 382.
9. Adamyan, Yu. E. Investigation of Influence of Pulse Electric Current on High-Speed Deformation of Copper M1 by Magnetic Pulse Loading / Yu.E. Adamyan, S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, D.I. Alekseev, I.S. Kolodkin // *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).* - January 28-30, 2019. - Pp. 788.
10. Krivosheev S.I. The peculiarities of the application of magnetic+pulse method for forming controlled pressure pulses to test metal samples / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, D.I. Alekseev // *Proceedings of the fifteenth international conference on megagauss magnetic field generation and related topics.* - September 18-22, 2016. - Pp. 39-42.
11. Krivosheev, S.I. On the impact of the elastic-plastic flow upon the process of destruction of the solenoid in a super strong pulsed magnetic field / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, D.I. Alekseev // *Proceedings of the fifteenth international conference on megagauss magnetic field generation and related topics.* - September 18-22, 2016. - Pp. 43-45.

Основной материал диссертации представлен в 10 научных публикациях.

Личный вклад автора состоит в адаптации экспериментального стенда для проведения исследований, выборе методик, разработке образцов, проведении эксперимента. Автором проведён анализ, обобщение экспериментальных данных и результатов моделирования поведения образцов в условиях высокоскоростного нагружения, создаваемого магнитноимпульсным способом. Принимал непосредственное участие в подготовке и написании статей.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, постановки задачи и заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка

литературы из 120 наименований и 5 приложений. Работа изложена на 183 стр., содержит 75 рисунков, 10 таблиц.

Благодарности: Минобрнауки России (программа повышения конкурентоспособности 5-100). Минобрнауки России (грант №RFMEFI58416X0019) и Swiss National Science Foundation (Projects No. 200021_147058 and IZLRZ2-163907/1): совместный проект по исследованию «Влияние экспериментально полученных форм импульса тока молнии на механические характеристики композитных структур».

Российскому научному фонду (грант РФФ № 18-19-00230): проект «Моделирование и экспериментальная апробация соленоидов с квазибессиловыми обмотками применительно к задачам получения сильных и сверхсильных магнитных полей и накопления энергии».

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.scc.spbstu.ru).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Методы испытания динамических свойств материалов при высокоскоростном нагружении

Испытание динамических свойств материалов может производиться различными методами, среди которых наибольшее распространение получили испытания на ударный изгиб, откольные испытания, метод Тейлора, метод Гопкинсона-Кольского, а так же магнитноимпульсные способы создания управляемых нагрузок. Магнитноимпульсные способы позволяют создавать растягивающие нагрузки, без предварительной фазы сжатия материала, как например в откольных схемах, что упрощает верификацию моделей пластичности. Магнитноимпульсное нагружение образцов с макродефектом типа трещин позволяет нагружать образцы без существенного нагрева под действием наведенного тока, в отличие от магнитноимпульсного нагружения кольца во внешнем поле соленоида, где нагружение выше предела пластичности так же сопровождаются существенным нагревом.

Возможность воздействия импульсного тока на исследуемые образцы, проводимого параллельно или между циклами деформирования, как за счет наведенного тока в образцах от МИД, так и от дополнительного источника импульсного тока позволяет рассматривать свойства проводящих материалов в условиях воздействия импульсного тока с различными параметрами.

Глава 2. Разработка схемы нагружения и анализ особенностей взаимодействия импульсного магнитного поля с проводящими образцами

На рисунке 1а приведена схема магнитноимпульсного испытания проводящих образцов с макродефектом типа трещин. Здесь используется генератор импульсных токов (ГИТ), который создаёт при разряде батареи конденсаторов C_p импульсный электрический ток $i(t)$, протекающий по магнитноимпульсному драйверу (МИД). При этом МИД представляет собой

плоскопараллельные шины, которые могут быть выполнены в виде прямого и обратного проводника - простой МИД (см. рисунок 1б), и двух прямых и одного обратного проводника - трёхшинный (квазикоаксиальный) МИД (см. рисунок 1с). В данной схеме импульсный электрический ток $i(t)$ протекающий в МИД, сопровождается импульсным магнитным полем B , которое оказывает магнитное давление P_m . Применения квазикоаксиального нагружающего устройства существенно снижает (на два порядка) наведённый ток в окрестности вершины паза образца, соответствующей зоне максимальных механических деформаций, при этом непосредственно в самой вершине наведённый ток равен 0.

Приближено, если ширина шин МИД c_{MPD} существенно меньше расстояния между шинами h_{MPD} , то магнитное давление можно оценить следующим образом:

$$P_m \approx \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{\mu_0 (I/c_{MPD})^2}{2}, \quad (2.1)$$

где I , H , B - амплитуды тока протекающего по шинам, напряжённость и индукция магнитного поля МИД соответственно.

С учетом конечных размеров образцов при деформировании под воздействием импульсного магнитного поля может возникнуть ситуация, когда глубина проникновения поля меньше или сопоставима с характерными размерами образца. В этом случае взаимодействие магнитного поля МИД с образцом имеет сложную структуру, однако можно выделить зоны, в которых имеют места типичные режимы на углах проводников. В одном случае это соответствует ситуации, когда линии наведенного тока параллельны грани угла, а в другом перпендикулярны ей. Проведено численное моделирование для этих характерных случаев процесса нелинейной диффузии магнитного поля. Так протекание тока вдоль грани приводит к усилению плотности тока на ней (см. рисунок 2в), а при протекании тока поперек грани плотность тока на грани стремится к нулю (см. рисунок 2г). Нагрев материала приводит к перераспределению плотности тока и смещению максимума плотности тока в толщу проводника. Распределения тока на углу влияет на распределение нагрева и силы Лоренца, что обуславливает характер деформации, например в зоне токоподвода соленоида, где отсутствие тока на углу проявляется в отсутствии силы Лоренца в этой зоне.

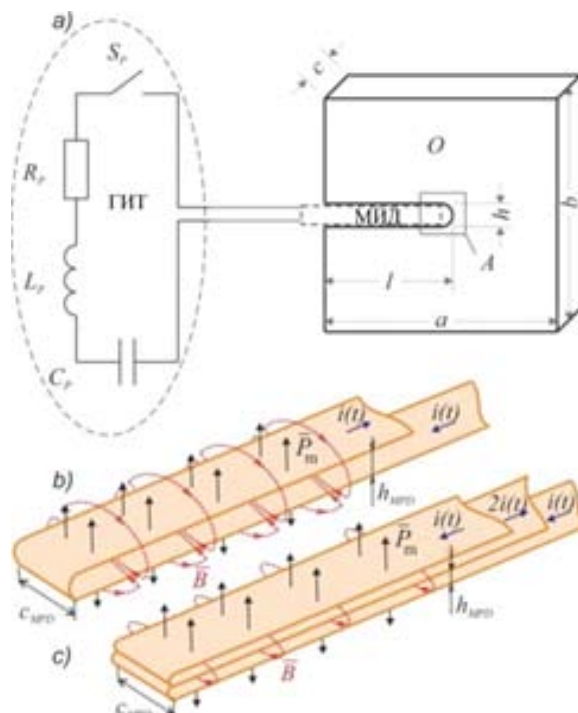


Рисунок 1. а) Схема магнитноимпульсного испытания образцов с макродефектом типа трещин; б) простой МИД; в) квазикоаксиальный МИД.

Для выяснения структуры наведенных токов в проводящем образце проведено численное моделирование процесса взаимодействия импульсного магнитного поля драйвера с образцом в 3-Д постановке, результаты которого показывают, что в зоне максимальных деформаций при использовании квазикоаксиального драйвера плотность наведенного тока близка к нулю. Джоулев нагрев образца от наведенных токов при использовании простого МИД не превышает 20°C в микросекундном диапазоне нагружения.

В этой же главе приведены результаты численного моделирования с использованием модели Джонсона-Кука (ЖС) напряженно-деформированного состояния образца,

демонстрирующие в зависимости от соотношения размеров последнего и длительности нагружения возможность формирования ударно-волнового или квазистационарного режима нагружения. При этом достигаются скорости деформирования меди ОФНС до 10^4 - 10^5 1/с.

Глава 3. Экспериментальное и численное исследование формирования импульсного давления и влияния неоднородностей в токоведущих элементах на его параметры

Приведено описание генератора импульсных токов ГИТ-50/12, адаптированного к проведению исследований по формированию импульсных давлений с использованием МИД. Показано, что при ёмкости $C_p=14.8$ мкФ и собственной индуктивности $L_p=79$ нГн этот генератор при зарядном напряжении 25 кВ формирует импульс тока в виде затухающей синусоиды с амплитудой ~ 350 кА с периодом 5.9 мкс. Включение ГИТ на индуктивную нагрузку в виде МИД обеспечивает формирование импульса давлений с амплитудой порядка 0.5 ГПа с длительностью первой полуволны синусоиды около 4 мкс. Управление амплитудой магнитного давления возможно путём изменения амплитуды тока (зарядного напряжения ГИТ) и/или ширины шин драйвера.

Внесение в магнитную систему МИД проводящего образца приводит к изменению структуры магнитного поля, вид которой, в соответствии с результатами численного моделирования, для различных МИД и образцов с различной проводимостью приведён на

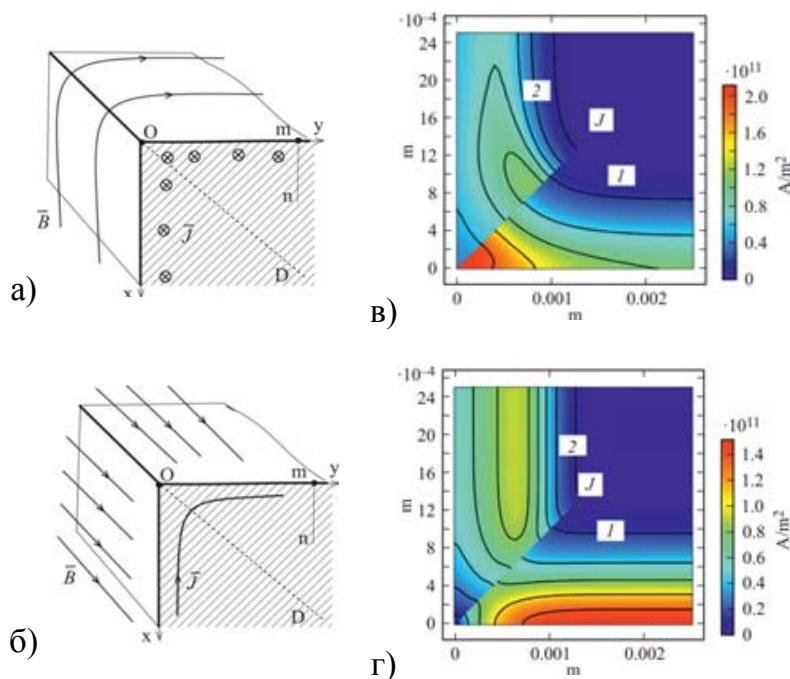


Рисунок 2. Ориентация (а) поперечного и (б) продольного полей. Распределение плотности тока на краю проводника при (в) поперечном и (г) продольном поле: 1 - без учёта нагрева; 2- с учетом нагрева.

рисунке 3, демонстрирующий существенное влияние проводимости образца на распределение магнитного поля. По результатам численного моделирования проведено уточнение параметров магнитного давления, определяемых формулой (2.1), для используемых в дальнейших экспериментах размеров МИД.

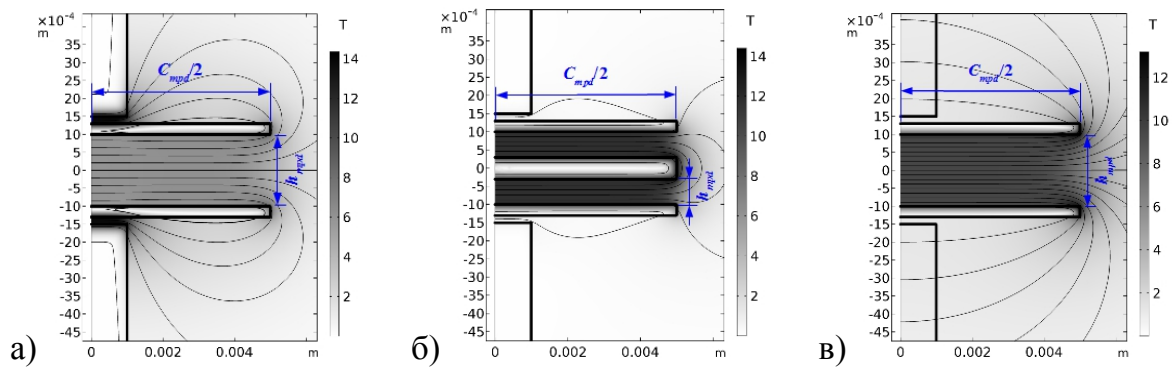


Рисунок 3. Распределение магнитного поля МИД: а) простой МИД, проводящий образец; б) квазиоаксиальный МИД, проводящий образец; в) простой МИД, непроводящий образец.

С учетом требований к однозначному определению пространственного распределения давления, прикладываемому к образцу, обусловленного требованиями к анализу напряженного состояния в образце, проведено численное моделирование влияния возможных дефектов на краю токоведущих шин драйвера и показано, что их влияние на равномерность распределения давления проявляется на масштабе дефекта.

Экспериментально исследовано развитие дефекта в виде микротрещины, нормальной к кромке шины и показано, что размер кратера в вершине трещины, возникающего в процессе протекания тока зависит от размера дефекта и определяется структурой токораспределения вблизи его вершины.

Также проведено экспериментальное исследование и численное моделирование процесса накопления пластических деформаций на кромке тонкостенного одновиткового соленоида при генерации импульсных магнитных полей. При накоплении критических деформаций на кромке происходит зарождение дефекта, развитие которого при дальнейшем использовании соленоида носит катастрофический характер, см. рисунок 4.

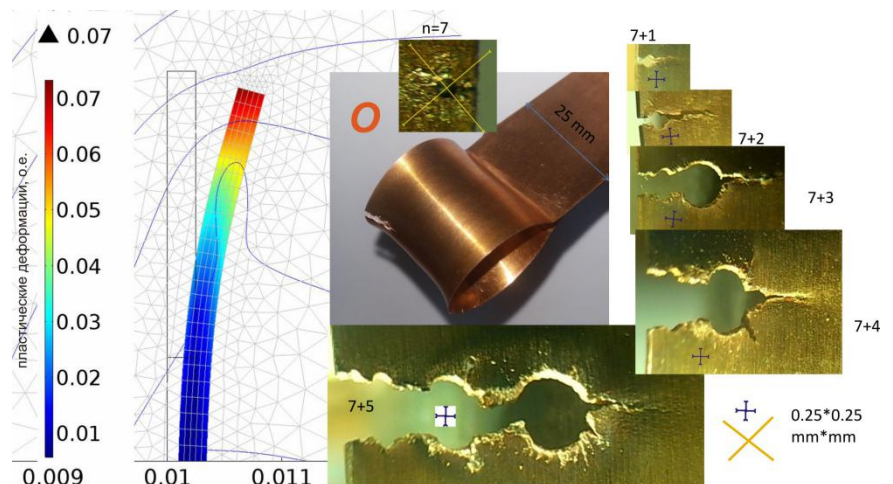


Рисунок 4. Пластические деформации и разрушение соленоида после пропускания $n=7$ импульсов тока.

Глава 4. Экспериментальное исследование проводящих образцов при импульсном нагружении, создаваемом магнитноимпульсным способом

В настоящей главе проводится экспериментальное исследование образцов с макродефектом типа трещины из углепластика с проводимостью $\sim 10^3$ 1/(Ом·м) и из меди с проводимостью $\sim 6 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м) магнитноимпульсным способом по схеме рисунка 1а.

Для исследования свойств углепластика из последнего выполнено 10 образцов с макродефектом типа трещины и проведена серия экспериментов с применением простого МИД. В этих опытах структура магнитного поля близка к показанной на рисунке 3в. На основе полученных данных построена зависимость длины образующегося дефекта (трещины) в вершине паза после нагружения от амплитуды приложенного давления, см. рисунок 5.

Видно, что разрушение углепластика в динамическом режиме носит пороговый характер, при длительности импульса ~ 4 мкс пороговое значение амплитуды импульса давления составляет ~ 95 МПа.

При помощи численного моделирования проведена оценка напряженного состояния в вершине паза образцов при нагружении, соответствующем пороговому и статическим модулем упругости в направлении соответствующем растяжению материала в рассматриваемой серии экспериментов. По результатам расчёта, в динамическом режиме значения предельного напряжения и энергии упругой деформации существенно выше, чем при испытании материала образцов на статическое растяжения. Для точного определения динамического предела прочности углепластика с помощью численного моделирование эксперимента при нагружении образца с пороговой амплитудой, нужно определение его анизотропных свойств при статическом нагружении.

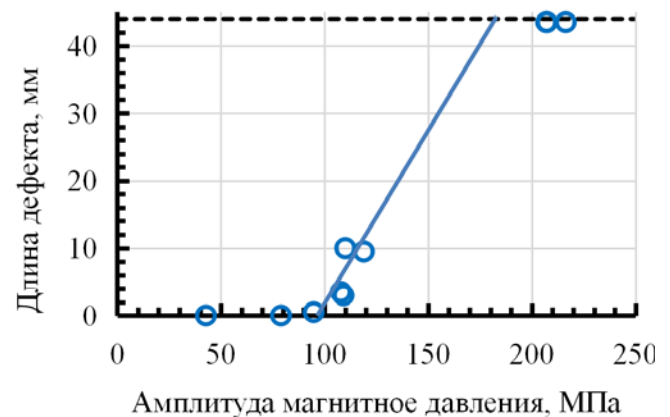
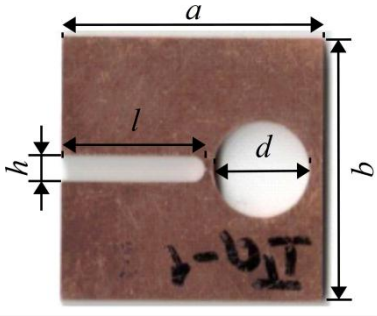
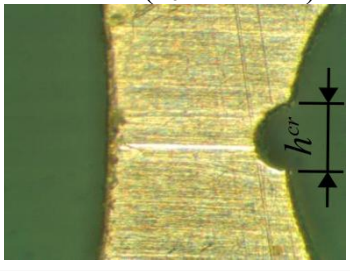
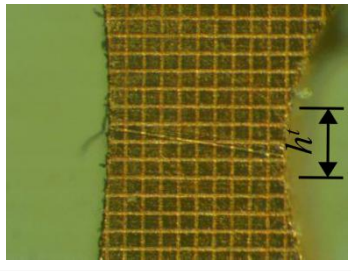


Рисунок 5. Зависимость длины дефекта от амплитуды магнитного давления.

Для исследования свойств меди М1 магнитноимпульсным способом по схеме рисунка 1а, из неё выполнены образцы двух типов, вид и размеры которых представлены в таблице 1. В представленных образцах, выполнены отверстия диаметром d для снижения неоднородности распределения напряжений в вершине паза и увеличения деформируемости образцов. В образцах Па в вершинах паза выполнен прорез (прекрёк), диаметром $d_{cr}=0.4$ мм. На образцах Пб в вершине паза нанесена квадратная сетка с шагом 0.1 мм при помощи лазера, для регистрации деформирования.

На 10 образцах Па выполнена серия экспериментов с применением простых МИД, при изменении ширины последних и зарядного напряжения конденсаторов. Результаты экспериментов для относительного раскрытия краёв паза h_e/h и прекрёка h_e^{cr}/h^{cr} , где h_e , h_e^{cr} - высоты краёв паза и прекрёка после эксперимента, приведены на рисунке 6.

На образцах Пб выполнена серия экспериментов с применением квазикоаксиальных МИД, при изменении ширины последних и амплитуд тока. Результаты экспериментов для относительного раскрытия краёв h_e/h и вершины h^t_e/h^t , где h^t_e - высота 4-х элементов сетки после эксперимента, приведены на рисунке 7.

Таблица 1 Типовые размеры экспериментальных образцов		
Вид образца	Размеры.	Вершина паза
	$a=b=3$ см; $c=2$ мм; $l=16.5$ мм; $h=3$ мм; $d=1.1$ см;	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Тип Па ($d_{cr}=0.4$ мм)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Тип Пб</p>  </div> </div>
<p>Здесь a, b, c – длина, ширина и толщина образца; l – длина паза до вершины; $h, h^{cr} = d_{cr}$, h^t – высоты краёв паза, прекрэка и 4-х ячеек сетки в вершине паза для образца без прекрэка соответственно.</p>		

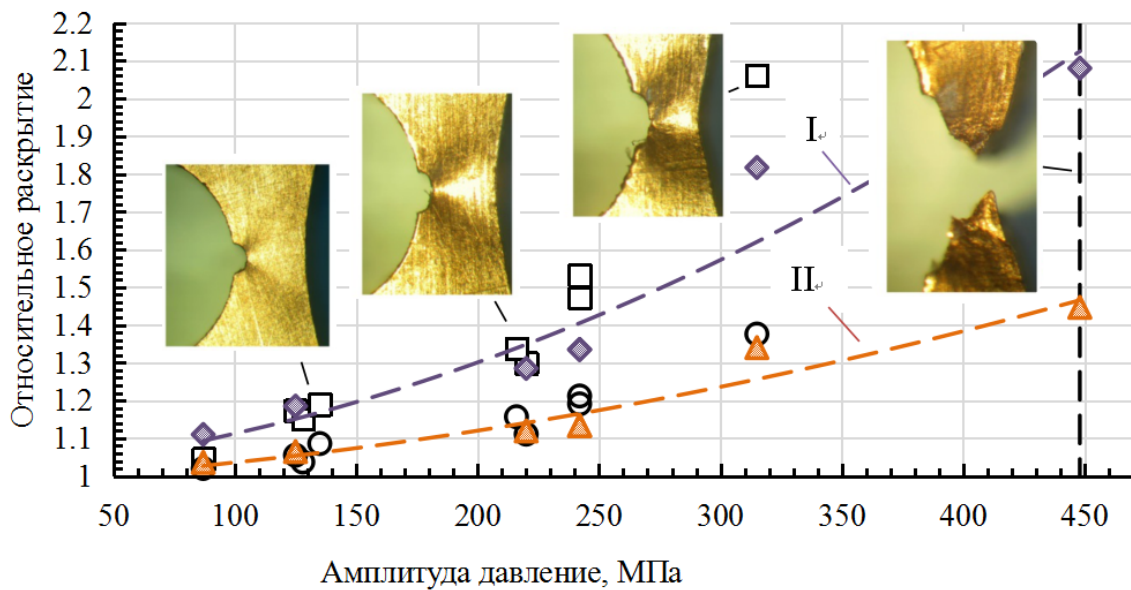


Рисунок 6. Зависимости относительного раскрытия прекрэка h^{cr}_e/h^{cr} - I и краёв паза h_e/h - II от амплитуды давления. Пустые точки - эксперимент, заштрихованные - расчет по модели Джонсона-Кука.

Из рисунка 6 видно соответствие экспериментальных результатов при применении простых МИД и численного расчёта в диапазоне раскрытия прекрэка $\sim 17-30$ %, при этом средние расчётные скорости деформирования достигают $\sim 5300 - 7500$ 1/с. При больших раскрытиях паза ~ 106 % расхождение эксперимента с расчетом может быть связано с появлением трещин в вершине паза.

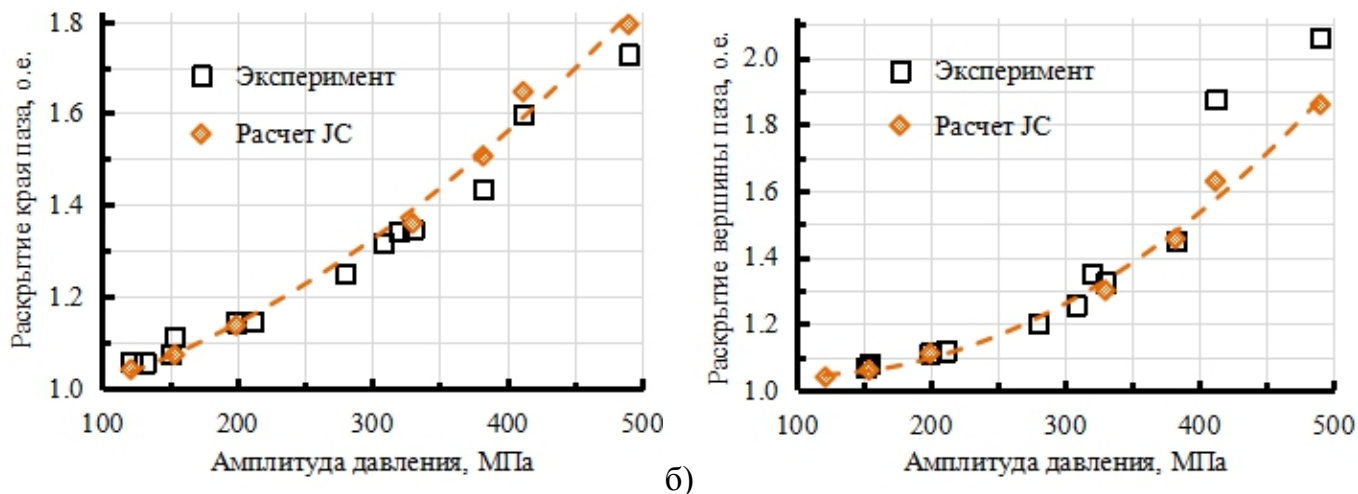


Рисунок 7. Зависимости относительного раскрытия краёв h_e/h (а) и вершины h^t_e/h^t (б) паза от амплитуды давления.

Сопоставление результатов конечной деформации в ходе экспериментов на образцах Пб с применением квазикоаксиальных МИД и результатов численного моделирования, см. рисунок 7, выявило соответствие расчётной модели Джонсона-Кука (JC) для OFHC меди с экспериментальными данными для меди марки М1 до раскрытия вершины паза ~35%. При этом расчётные скорости деформирования лежат в диапазоне 2000-7250 1/с. При больших давлениях и раскрытиях наблюдается расхождение, которое так же может быть связано с появлением частичного разрушения вершины паза.

Максимальный расчётный нагрев образца под действием наведённого тока при применении простого МИД составил 18 °С, что согласно модели Джонсона-Кука повлияет на снижение предела упругости на 2%. Расчётное давление в вершине паза на образец за счет наведенных токов при применении простого МИД не превышает 10 МПа, при воздействии на берега паза образца магнитного давления 421 МПа.

Сопоставление рассчитанных конечных деформаций по модели JC и результатов эксперимента показывают соответствие расчетных данных и экспериментальных, как для простых так и для квазикоаксиальных МИД. При этом в случае квазикоаксиального МИД наведённая плотность тока в вершине паза равна нулю и в окрестности вершины существенно ниже (см. рисунок 8б), чем в случае простого МИД, где плотность тока достигает значений 30-45 кА/мм² (см. рисунок 8а). Таким образом, сильно затухающий импульсный электрический ток, пропускаемый в начале деформирования образца,

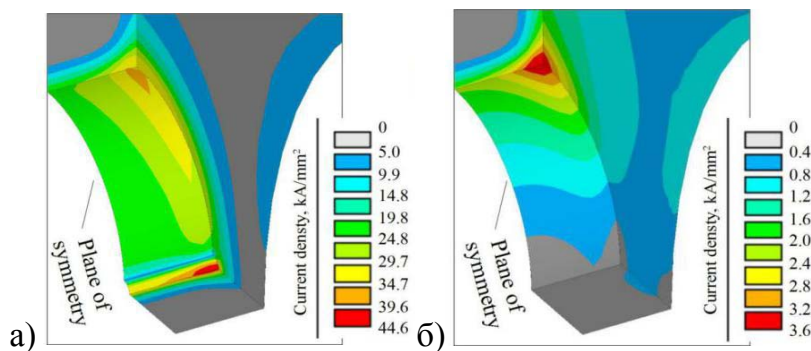


Рисунок 8. Распределение плотности тока в образцах (а) с прекрэком при простом МИД и (б) без прекрэка при квазикоаксиальном МИД.

длительностью ~ 4 мкс и амплитудой плотностью $\sim 30-45$ кА/мм² не влияет на конечную деформацию.

Для исследования влияния импульсного тока на конечную деформацию проведены несколько серий экспериментов при установке на квазиоаксиальный МИД 1-2 образцов, см. рисунок 9.

В первой серии экспериментов по одному из образцов пропускался дополнительный импульсный ток, при подключении образца через добавочную индуктивность L_{sec} параллельно МИД (мода I, Рисунок 9). При этом амплитуда импульсного тока, пропускаемого по образцу составляла 1-2 кА на сечении 5 мм², при сохранении формы тока МИД, см. Рисунок 10а. В данной серии было проведено 11 опытов на двух образцах. При

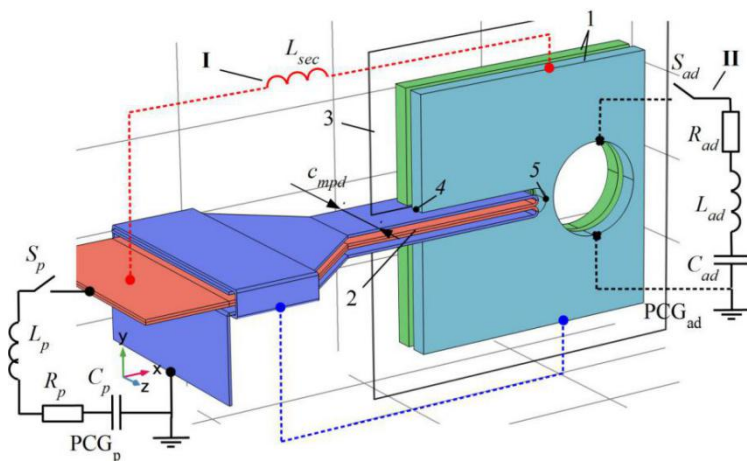


Рисунок 9. Схема испытания двух одновременно испытываемых образцов при пропускании по одному из них тока.

каждом последующем опыте брались образцы, деформированные в предыдущем эксперименте. При этом между опытами по образцу, который подвергался токовому воздействию пропускались ещё два аналогичных импульса тока амплитудой 1-2 кА. После каждого опыта регистрировалось раскрытие краёв паза. Результаты экспериментального раскрытия краёв паза образцов данной серии представлены на рисунке 11.

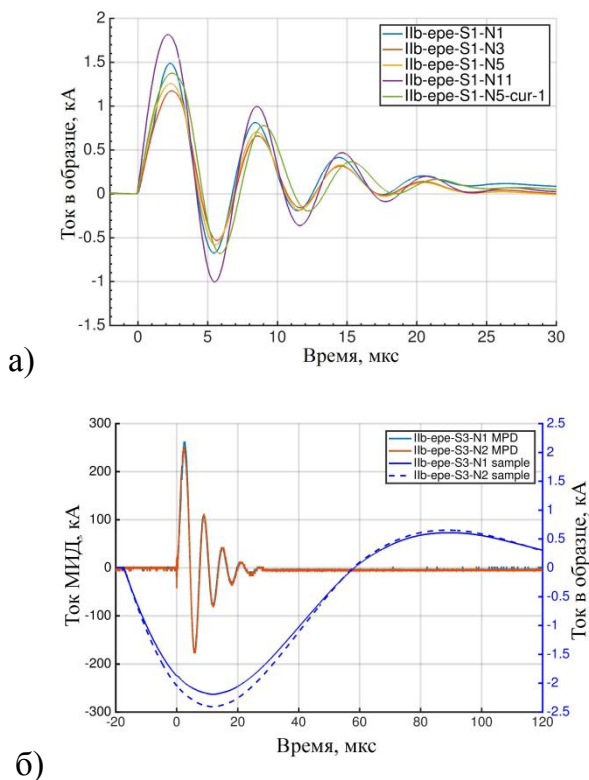


Рисунок 10. Осциллограммы токов пропускаемых по одному образцу (а) через вторичную индуктивность L_{sec} (а) и от дополнительного источника PCG_{ad} (б).

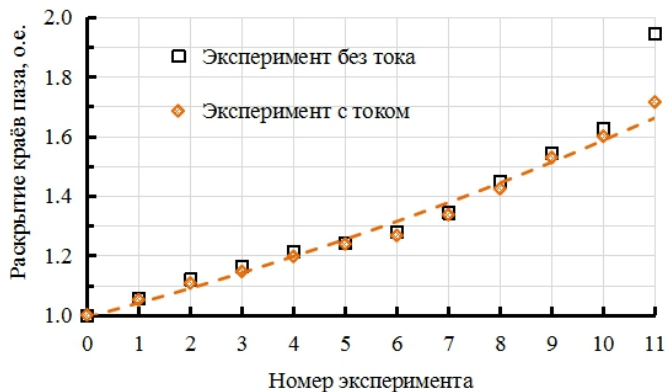


Рисунок 11. Зависимости относительного раскрытия краёв паза от номера эксперимента.

Как видно из рисунка 11 раскрытия краёв паза двух образцов с дополнительным током и без него до разрушения образцов практически не отличаются, относительное раскрытие краёв паза без тока на 0.5-3% больше, чем с током. На 11 эксперименте образец без тока полностью разрушился, в образце с током наблюдается частичное разрушение в виде трещин.

Во второй серии экспериментов на квазикоаксиальный МИД так же устанавливалось два образца и по одному из образцов пропускался импульсный ток от дополнительного источника (мода II, Рисунок 9), с длительностью импульса ~ 74 мкс и амплитудой $\sim 2-2.5$ кА на сечении 5 мм^2 , см. рисунок 10б. Синхронизация тока МИД с дополнительным током, пропускаемым по образцу, выполнена с задержкой тока МИД на ~ 20 мкс. После первого нагружения раскрытия краёв пазов образцов составило 9.2% и 11.3% с током и без тока соответственно, а после второго нагружения 20.8% для обоих образцов.

В третьей серии экспериментов с целью получения больших деформаций за одно нагружение на квазикоаксиальный драйвер устанавливалось по одному образцу и пропускался дополнительный импульс тока от внешнего источника по образцу, длительностью ~ 56 мкс и амплитудой $\sim 4-5$ кА на сечении 5 мм^2 . В результате экспериментов фиксировались относительные раскрытия краёв и вершины паза. Результаты данной серии экспериментов до разрушения совпадают с результатами расчёта деформирования по модели Джонсона-Кука (JC). Таким образом можно отметить, что импульсный ток пропускаемый в ходе экспериментов по образцам не повлиял на их конечную деформацию.

Сопоставление численного моделирование с результатами конечной деформации в ходе экспериментов выявило соответствие расчётной модели пластичности JC для меди OFHC с экспериментальными данными для меди марки M1 в диапазоне изменения скорости деформирования 2000-7500 1/с. При этом параметры меди OFHC по модели JC были получены для скоростей деформирования в диапазоне 1-1000 1/с. Следовательно можно анализировать поведение меди марки M1 по модели JC для меди OFHC в диапазоне скоростей деформирования 1-7500 1/с.

Для анализа свойств испытуемого материала и описания перехода из упругого состояния в пластическое в программе Comsol Multiphysics в модуле General Equations выполненное численное решение системы уравнений по модели JC при разных линейных скоростях нарастания V механического напряжения σ . По расчётным данным получена зависимость времени τ_p^{e-p} до перехода в пластическое состояние соответствующее пластическим деформациями равным 0.2 % от работы деформирования $w_p = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$, см. рисунок 12.

По построенным зависимостям получены аппроксимации времени до перехода τ_p^{e-p} от работы деформирования w_p :

$$\tau_p^{e-p}(w_p) = (\alpha_{M1} \cdot w_p)^{-\beta_{M1}},$$

где $\alpha_{M1} = 7 \cdot 10^{-6}$, $\beta_{M1} = 33.8$ - соответствуют пластическим деформациям 0.2 %.

Таким образом, при данных значениях параметров α_{M1} , β_{M1} критерий вида:

$$\Phi = \int_0^{\tau_p^{e-p}} \frac{1}{\tau_p^{e-p}(w_p)} dt = \alpha_{M1}^{\beta_{M1}} \int_0^{\tau_p^{e-p}} \left(\int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \right)^{\beta_{M1}} dt \leq 1,$$

применим для описания упруго-пластического перехода меди марки М1 в диапазоне скоростей деформирования от квазистатических до 7500 1/с.

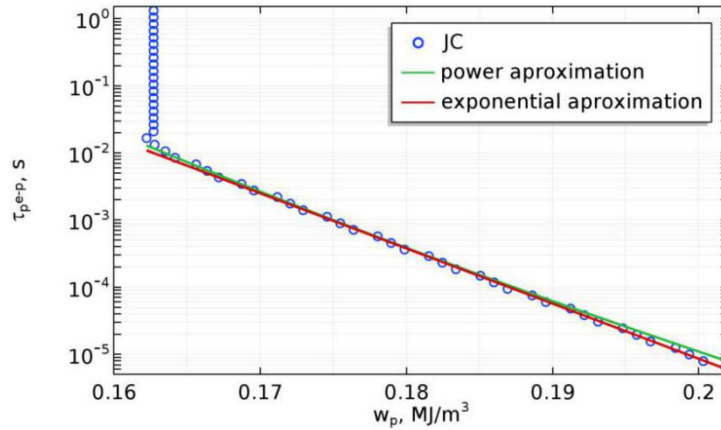


Рисунок 12. Зависимость времени перехода меди в пластическое состояние τ_p^{e-p} от потенциальной энергии w_p . Синие точки получены по модели JC; зелёная и красная линии аппроксимации.

Заключение

Магнитноимпульсный способ формирования управляемых ударных нагрузок позволяет испытывать проводящие материалы при скоростях деформирования 10^3 1/с - 10^4 1/с в различных схемах нагружения.

Показано, что при динамическом испытании образцов из углепластика с макродефектами типа трещин процесс разрушения носит пороговый характер. Показана возможность определения динамического предела прочности углепластика при нагружении микросекундной длительности при помощи магнитноимпульсного способа. Влияние импульсных магнитных полей с амплитудой до 12 Т на статическую прочность углепластика не выявлено.

Экспериментальное испытание медных образцов марки М1 с макродефектом типа трещин при магнитноимпульсном нагружении показало соответствие результатов численного моделирования деформирования и полученных экспериментальных данных при применении модели Джонсона-Кука для меди OFHC в диапазоне скоростей 2000- 7500 1/с.

Продемонстрирована возможность исследования влияния импульсных токов микросекундного диапазона длительностей на конечную деформацию проводящих материалов. Испытания медных образцов магнитноимпульсным способом при скоростях деформирования 2000-7500 1/с с действием токов в начале деформирования с амплитудой плотностью тока 35-40 кА/мм², длительностью 4 мкс, и импульсного тока амплитудой 4-5 кА

по сечению 5 мм², длительностью 60 мкс не выявило влияния тока на конечную деформацию образцов. Однако отсутствие влияния тока в использованном в опытах диапазоне амплитуд и длительностей не исключает его влияния при других комбинациях параметров токового импульса.

Список публикаций автора по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК:

1. Ю.Э. Адамьян Выявление поперечных материальных границ в многослойных техногенных структурах / Ю.Э. Адамьян, А.А. Белов, К.В. Грешневиков, Г.П. Жабко, И.С. Колодкин, С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов, Е.Л. Свечников, В.В. Титков. - Дефектоскопия. - № 4. - 2016. - С. 3-15.

2. Krivosheev, S.I. Adaptation of the magnetic pulse method for conductive materials testing / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, Yu.E. Adamyan, D.I. Alekseev, V.V. Titkov, L.V. Chernenkaya // Materials Physics and Mechanics. - Vol. 40. - 2018. - Pp. 117-123.

3. Кривошеев, С.И. Особенности нелинейной диффузии сильного импульсного магнитного поля вблизи края проводника / С.И. Кривошеев, С.Г. Магазинов, Г.А. Шнеерсон // Письма в журнал технической физики. - Выпуск 3. - 2019. - С. 41.

В изданиях, индексируемых Scopus:

4. Krivosheev, S.I. Destruction of brittle materials by microsecond pressure pulses at their formation by magnetic pulse method / S.I. Krivosheev, N.V. Korovkin, V.K. Slastenka, S.G. Magazinov // International Journal of Mechanics. - Vol. 9. - 2015. - Pp. 293-299.

5. Krivosheev, S.I. Irreducible specific energy of new surfaces creation in materials with crack-type macro defects under pulse action / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov // Journal of Physics: Conference Series. - Vol. 774, Is. 1. - 2016. - 012049.

6. Krivosheev, S.I. High-speed deformation of copper samples with the use of magnetic pulse method / S.G. Magazinov, D.I. Alekseev // MATEC Web of Conferences. - 145. - 2018. - 05006.

7. Krivosheev, S.I. On the impact of the elastic-plastic flow upon the process of destruction of the solenoid in a super strong pulsed magnetic field / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, D.I. Alekseev // Journal of Physics: Conference Series. - Vol. 946. - conference 1. -2018. - 012040.

8. Krivosheev, S.I. The peculiarities of the application of magnetic-pulse method for forming controlled pressure pulses to test metal samples / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov, D.I. Alekseev // IEEE Transactions on Plasma Science. - Vol. 46, Is. 4. - 2018. - Pp. 1054 - 1057.

9. Krivosheev, S.I. The impact of local current density increase on conductor destruction / S I Krivosheev, Yu E Adamian, D I Alekseev, S G Magazinov, L V Chernenkaya, V V Titkov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. - 1147. - 2019. - 012033.

В прочих изданиях:

10. Krivosheev, S.I. Fracture energy of materials exposed to pulse action / S.I. Krivosheev, S.G. Magazinov // Universal Journal of Physics and Application. - Vol. 10(6). - 2016. - Pp. 181-189.