



РУССКИХ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
СИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург
2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН).

Научный руководитель: **Болтачев Грэй Шамилевич**,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
лаборатории комплексных
электрофизических исследований
ИЭФ УрО РАН, г. Екатеринбург

Официальные оппоненты: **Яловец Александр Павлович**,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей и теоретической
физики, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Челябинский
государственный университет», г. Челябинск

Магазинов Сергей Геннадьевич,
кандидат технических наук,
доцент высшей школы высоковольтной энергетики,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский физико-технический
институт (национальный исследовательский
университет)», г. Долгопрудный

Защита состоится “_____” 2025 г. в ____ часов ____ минут на заседании Дисс.
совета 24.1.160.01 в Институте электрофизики Уральского отделения Российской
академии наук (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института элек-
трофизики УрО РАН, <https://www.iep.uran.ru/diss/publ/>

Автореферат разослан “_____” 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Медведев М.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Магнитные поля на протяжении длительного времени являются важным объектом исследований и многофункциональным инструментом воздействия на различные материалы. Сильное магнитное поле, амплитудой, свыше 30 Тл, в силу технических ограничений может быть создано только в импульсном режиме [1]. Первые работы по генерации сильных импульсных магнитных полей проводились выдающимся советским физиком П. Л. Капицей в начале прошлого века. В наши дни сильные магнитные поля используются в науке для изучения электронной структуры полупроводников и квантового эффекта Холла, исследования больших биомолекул, используются в работах, посвящённых магнитной кумуляции, физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Также силовое действие магнитного поля, вызывающее ускорение проводников, дало основу для широкого круга технологий магнитно-импульсной обработки. Примерами могут служить прессование нанопорошков [2,3], деформирование проводящих оболочек [4], создание прочного соединения между разнородными материалами [3]. Для многих технологий магнитно-импульсной обработки существенным ограничивающим фактором является невысокий ресурс индукторных систем, генерирующих сильные магнитные поля, поскольку главный элемент системы — индуктор, обычно представляющий собой низкоиндуктивный массивный одновитковый соленоид, подвергается значительным знакопеременным механическим напряжениям. В частности, оказываемое импульсным магнитным полем с индукцией 50 Тл давление на ограничивающую поверхность проводящего материала, составляет порядка 1 ГПа. Ещё больших значений могут достигать возникающие термомеханические напряжения, которые обусловлены быстрым импульсным джоулевым нагревом проводника и последующим остыванием. В результате сильных знакопеременных механических воздействий на поверхности материала могут образовываться микротрещины [5]. При дальнейшей эксплуатации эти микротрещины быстро увеличиваются из-за «эффекта пилы» [1, 5, 6], заключающегося в значительном усилении плотности тока на неровностях и приводящему, в конечном счёте, к разрушению рабочей поверхности индуктора. Актуальность настоящего диссертационного исследования заключается в предложении и подробном изучении эффективных способов повышения амплитуды генерируемых импульсных магнитных полей без угрозы разрушения проводящего материала.

Отдельного рассмотрения требует влияние шероховатости на рабочей поверхности проводника, которая может способствовать локальной концентрации поверхностной плотности тока и, как следствие, формированию точек повышен-

ного тепловыделения. Увеличение амплитуды термомеханических напряжений в окрестности этих точек повышает вероятность зарождения микротрещин. Помимо стойкости рабочей поверхности индукторных систем, генерирующих сильные импульсные магнитные поля, данный эффект высоко актуален для вакуумных токоподводящих линий [7], которые входят в состав мультитераваттных импульсных генераторов с амплитудой тока 30-50 МА и временем нарастания тока менее 100 нс. В экспериментах наблюдается быстрый перегрев поверхности проводника, сопровождающийся электрическим взрывом, образованием плазмы, и последующим шунтированием тока, что приводит к существенному снижению ожидаемой эффективности передачи электромагнитной энергии в нагрузку. В случае рассмотрения идеально гладкого проводника появление отдельных областей повышенного тепловыделения непосредственно связано с неоднородностью его микроструктуры. В работе [8] наличие поверхностных шероховатостей рассматривается как одна из наиболее вероятных причин неравномерности нагрева и повышенного тепловыделения, проявляющегося в виде светящихся точек на поверхности подводящих проводников. Изучению эффекта концентрации плотности тока в окрестности различных модельных типов поверхностной шероховатости посвящена заключительная глава представленной работы.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в изучение магнитной диффузии и способов повышения стойкости проводников был сделан Г. А. Шнеерсоном [6], И. М. Карповой и В. В. Титковым [9]. В их работах было показано, во-первых, что для плоской проводящей пластины с удельным сопротивлением, снижающимся с глубиной в 100 раз и более, тепловыделение в материале может быть снижено в 3-5 раз. Экспериментально такое распределение может быть реализуемо методами порошковой металлургии. А, во-вторых, проанализировано влияние оптимизации формы магнитного импульса на тепловыделение и показан эффект снижения тепловыделения, порядка 8 % для униполярного импульса. Но в их работах не производился учёт изменения удельного сопротивления с температурой, которое при генерации сильных импульсных магнитных полей амплитудой 50 Тл и выше может увеличиться более чем вдвое. Учёт удельного сопротивления делает задачу нелинейной, что допускает аналитическое решение только для полупространства с определённым законом нарастания магнитного поля на границе [10]. Анализ нелинейной диффузии и термомеханических напряжений в более близких эксперименту условиях таких как импульс в виде затухающей синусоиды, геометрия толстого плоского или цилиндрического проводника требуют использование численных методов. Теоретические исследования, где проводился бы подобный анализ, до сих пор отсутствовали.

Целью работы является исследование воздействия сильного импульсного магнитного поля на проводники и анализ эффективности способов повышения амплитуды генерируемых импульсных магнитных полей без угрозы разрушения проводящего материала. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Разработка численных моделей нелинейной магнитной диффузии, возникающих термомеханических напряжений и деформаций в плоском проводящем слое, одиночном одновитковом соленоиде и концентраторе магнитного потока, помещённого внутрь одновиткового соленоида, подключённого к RLC-контур.
- Анализ основных характеристик протекающих электрофизических процессов в рамках построенных моделей и исследование эффективности предложенных ранее и новых способов повышения стойкости проводника в сильных импульсных магнитных полях.
- Проведение двумерного моделирования диффузии азимутального импульсного магнитного поля в цилиндрический проводник с аксиально-симметричными неровностями на поверхности и анализ в их окрестности особенностей пространственных распределений плотности тока и мощности тепловыделения.

Научная новизна:

- Впервые для материала с произвольной температурной зависимостью предела текучести получены строгие аналитические выражения, определяющие амплитуды температур нагрева плоского проводника, соответствующие порогам хрупкого разрушения и разрушения по механизму малоциклового усталости.
- Получены аналитические выражения, позволяющие с высокой точностью оценивать пороговые амплитуды температур поверхностного нагрева проводника в цилиндрической геометрии, соответствующей описанию индукторных систем для генерации сильных импульсных магнитных полей.
- Выявлено, что использование градиентного профиля с удельным сопротивлением, в 2.5 раза превышающим сопротивление основной части материала, позволяет увеличить генерируемые магнитные поля без разрушения материала на 20-25 % как в плоской, так и в цилиндрической геометрии.
- Для цилиндрического проводника, за счёт создания экспоненциально спадающего поверхностного профиля с удельным сопротивлением в 10^5 раз выше,

чем в основном материале, продемонстрирована возможность увеличения генерируемых без разрушения магнитных полей более чем в 2 раза.

- Показано, что повышение собственного сопротивления разрядного RLC-контура может увеличить безопасное для материала подключённой индукторной системы генерируемое магнитное поле примерно на 25 %.
- Установлено, что при диффузии азимутального магнитного поля пропорциональное уменьшение ширины и амплитуды аксиально-симметричных неровностей на поверхности цилиндрического проводника не приводит к снижению амплитуд локального тепловыделения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в диссертации аналитические выражения для температур возникновения пластических деформаций сжатия и растяжения в плоском и цилиндрическом проводниках позволяют проводить оценку их стойкости в сильном импульсном магнитном поле и осуществлять выбор наиболее подходящего материала проводника на основании его механических характеристик. Кроме того, выражения могут быть использованы для верификации результатов численного моделирования.

Предложены и теоретически обоснованы различные методы повышения стойкости проводников в сильных импульсных магнитных полях. Например, оптимизация формы импульса магнитного поля, применение градиентного профиля удельного сопротивления. Также показано влияние на стойкость геометрии проводника величины его удельного сопротивления. Применение представленных результатов при конструировании индукторов и концентраторов магнитного потока позволит значительно увеличить долговечность оборудования, которое может применяться для решения широкого круга технических и исследовательских задач.

Методы исследования. Численное решение уравнений магнитной диффузии и теплопроводности, полученных в этой работе, осуществлялось хорошо известным методом конечных разностей по схемам Кранка-Николсона второго порядка точности. При решении механической части задачи, состоящей из закона Гука, уравнения механического равновесия, критерия текучести Мизеса и ассоциированного закона пластического течения [11] использовались широко известные численные алгоритмы, такие как метод стрельбы и метод Ньютона. Двумерное уравнение магнитной диффузии для цилиндрического проводника с азимутальным магнитным полем также решалось методом конечных разностей по схеме второго порядка точности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана расчетно-теоретическая модель по оценке пороговых амплитуд импульсных магнитных полей, приводящих к разрушению рабочей поверхности индукторных систем, в рамках которой исследовано влияние на величину пороговых полей различных характеристик материала таких как электропроводность, теплоемкость, механические свойства и др., а также параметров импульсного воздействия.
2. В рамках модели идеального упруго-пластического тела с произвольной температурной зависимостью предела текучести получены аналитические выражения для температур, инициирующих разрушение плоского проводника по хрупкому типу и по механизму малоциклового усталости, а также предложены аналоги этих выражений для цилиндрического проводника.
3. Индукция магнитного поля, генерируемого плоским и цилиндрическим проводником без угрозы разрушения как по хрупкому типу, так и по механизму малоциклового усталости, может быть увеличена на 25-30 % при создании спадающего профиля с увеличенной в 2.5 раза амплитудой удельного сопротивления. Более чем двукратное увеличение индукции магнитных полей, генерируемых стальным цилиндрическим проводником без угрозы разрушения по хрупкому типу, достигается при использовании профилей с увеличением амплитуды удельного сопротивления в диапазоне 10^3 - 10^9 .
4. Для модельных аксиально-симметричных неровностей в виде одиночного расширения, сужения или периодической шероховатости показаны области усиления плотности тока и тепловыделения на поверхности проводника в сильном импульсном магнитном поле, и обнаружено, что пропорциональное уменьшение размеров неровностей вплоть до толщин термического скин-слоя, не приводит к снижению амплитуд локального тепловыделения.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 11 конференциях, среди которых 3 международных и 3 всероссийских:

1. 5 конференций молодых ученых ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025.
2. VII Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации», Екатеринбург, 2020.

3. 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Томск, 2020.
4. XXI, XXII, XXIII Всероссийская школа - семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС – 21, 22, 23, Екатеринбург, 2021, 2022, 2023.
5. Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах», Пермь, 2024.

Степень достоверности научных результатов. Обоснованность и достоверность результатов исследования обусловлена использованием широко известных численных алгоритмов решения дифференциальных и алгебраических уравнений; согласием полученных данных с аналитическими решениями и выражениями, найденными в литературе и полученными в ходе исследования; согласованностью результатов расчёта с экспериментальными данными.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация изложена на 112 страницах, включая 34 рисунка, 4 таблицы. Список литературы содержит 93 наименования.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, научная новизна и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, а также структура и объём диссертации.

В первой главе представлены основные результаты экспериментальных и теоретических исследований стойкости проводников в сильных импульсных магнитных полях. В общем виде изложены физические основы моделей, построенных в последующих главах. В частности, приведены уравнения магнитной диффузии и теплопроводности для проводника с током, содержащие общий параметр — удельное сопротивление. При учёте температурной зависимости параметра задача становится нелинейной и не допускает аналитическое решение в общем виде, однако возможны частные решения. Показано одно из таких решений, впервые представленное в работе А. Брайанта [10]. На примере этого решения аналитически анализируется возникающий при нелинейной диффузии «пик-эффект», который заключается в смещении плотности тока, а следовательно тепловыделения вглубь материала. Несмотря на важность температурной зависимости удельного сопротивления при описании сильных магнитных полей, в исследованиях, найденных

в литературе, зависимость не учитывалась. Важным отличием настоящей диссертационной работы является моделирование диффузии сильного аксиального импульсного магнитного поля в нелинейной постановке, т. е. с учётом изменения удельного сопротивления при нагреве.

Разрушение проводников в сильных импульсных магнитных полях обусловлено тремя факторами. Первый — это магнитное давление, вызванное силой Лоренца, возникающей при взаимодействии магнитного поля и проводника с током. Его величина учитывается при помощи уравнения равновесия и составляет порядка 1 ГПа в полях амплитудой 50 Тл. Второй и более значимый фактор разрушения это возникающие температурные напряжения [12]. Их учёт осуществляется при помощи закона Гука, который совместно с соотношениями между тензором полных деформаций и вектором перемещений, а также вышеупомянутого уравнения равновесия образуют замкнутую систему для описания разрушения проводника по хрупкому типу. В этом подходе появление любых пластических деформаций будет равносильно началу разрушения. Этот момент наступает при достижении напряжениями в материале условия пластичности Мизеса [11]. Дополнение модели ассоциированным законом пластического течения [11] и условием сохранения объёма при пластическом деформировании позволяет описывать разрушение по механизму малоциклового усталости. Согласно этому механизму, наличие в материале пластических деформаций только на стадии нагрева считается безопасным. А разрушение начинается при появлении пластических деформаций, под действием растягивающих напряжений, являющихся основной причиной образования микротрещин, которые очень быстро увеличиваются и выводят проводник из строя ввиду следующего фактора. Третьим фактором быстрого разрушения является значительное усиление плотности тока, а следовательно тепловыделения на неоднородностях таких как микротрещины, т. н. «эффект пилы», высокорезистивные внутренние включения, поверхностные неровности. Последние подробно изучены в пятой главе диссертации.

Проанализированы различные способы повышения стойкости проводника в сильных импульсных магнитных полях, представленные в литературе. Одним из таких способов является создание пространственного профиля с повышенным удельным сопротивлением, способствующим более равномерному энерговыделению. Профиль, состоящий из двух слоёв, приводил к снижению тепловыделения до 40 % [6], для 4 слоёв до 54 % и для 20 слоёв до 68 % [9]. Профиль с экспоненциально спадающим удельным сопротивлением увеличенным на поверхности в 100 раз позволял снизить тепловыделение более чем втрое [6]. Ещё одним способом является оптимизация формы импульса магнитного поля, снижение омического на-

грева от которого не превышало 8 % для униполярного импульса [9]. И последний способ — это использование и разработка материалов с улучшенными свойствами в частности высокой проводимостью, механической прочностью. В диссертационной работе большинство из перечисленных способов детально исследованы и сформулированы рекомендации и ожидаемые результаты от их применения.

Во второй главе исследована диффузия сильного импульсного магнитного поля, изменяющегося на границе плоского проводника по затухающей синусоиде. Построенная модель также корректно описывает процессы в толстых цилиндрических соленоидах в случае малости глубины проникновения поля относительно внутреннего радиуса проводника. В главе был подробно проанализирован процесс магнитной диффузии, в ходе которого индуцированные токи вызывают значительный нагрев проводника, и термомеханические напряжения.

Принципиальное значение при этом имеет вопрос возникновения пластического течения в материале, поскольку, как отмечалось в первой главе, от этого зависит будет ли проводник разрушаться в заданных условиях или же будет способен генерировать магнитные поля при многократном использовании без угрозы разрушения. Поэтому важным научным результатом диссертационной работы является получение аналитических выражений для температур, нагрев до которых приводит к возникновению пластических деформаций:

$$T_{\text{com}}^x = \frac{1 - \nu}{E\beta_V} \sigma_y(T_{\text{com}}^x), \quad T_{\text{ten}}^x = \frac{1 - \nu}{E\beta_V} (\sigma_y(T_{\text{ten}}^x) + \sigma_y(0)), \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга, β_V — коэффициент линейного расширения, $\sigma_y(T)$ — предел текучести материала, зависящий от температуры. Первое из выражений (1) определяет температуру T_{com}^x , соответствующую достижению сжимающих напряжений (compression) на стадии нагрева, инициирующих пластическое течение. Второе выражение описывает температуру T_{ten}^x , при которой полное охлаждение приводит к возникновению пластических деформаций под действием растягивающих напряжений (tension). Выражения для T_{com}^x и T_{ten}^x определяют температуры, достижение которых инициирует разрушение по хрупкому типу и по механизму малоциклового усталости, соответственно.

Дальнейшие результаты, представленные в главе, посвящены изучению способов повышения стойкости плоского проводника. Рекомендации формулировались на основании значения амплитуд импульса пороговых магнитных полей B_{com} и B_{ten} , названные по аналогии с соответствующими температурами. Превышение величины B_{com} импульсным магнитным полем на поверхности проводника будет приводить к его разрушению, если материал является достаточно хрупким, т. е. не обладает необходимым ресурсом пластичности. Вторая величина B_{ten} соответствует амплитуде поля на поверхности, вызывающей появление пластических де-

формаций на стадии остывания проводника, когда он испытывает растягивающие напряжения в тангенциальных направлениях. В этом случае материал подразумевается достаточно пластичным, т. е. допускается возникновение малых пластических деформаций под действием сжатия в течение первого импульса, но для последующих импульсов той же или меньшей амплитуды все деформации будут упругими, что также как и в первом случае позволит проводнику служить неограниченно долго. Амплитуда $B_{\text{тен}}$ с точностью менее 1 Тл была в $\sqrt{2}$ раз больше $B_{\text{ком}}$ для всех случаев, рассмотренных в работе. Это, с одной стороны, связано с пропорциональностью приращения температуры и квадрата индукции магнитного поля в уравнении теплопроводности и, с другой стороны, — отношением 1:2 значений температур $T_{\text{ком}}^x$ и $T_{\text{тен}}^x$, которое выполняется с высокой точностью при линейной температурной зависимости предела текучести, использованной в диссертации.

Детально исследовано влияние параметров импульса генерируемого магнитного поля на величины пороговых полей. В работе показано, что повышению стойкости проводника способствует генерация относительно длинных, с периодом более 50 мкс, быстрозатухающих импульсов магнитного поля. Применительно к индукторным системам это соответствует использованию электрических разрядных контуров, которые максимально эффективно отсекают протекание тока после первого полупериода электрических колебаний.

Далее исследовано влияние различных характеристик материала индуктора, использованных в соотношениях (1), а также объёмной теплоёмкости на величины пороговых полей $B_{\text{ком}}$ и $B_{\text{тен}}$. Анализ показал, что в качестве проводника предпочтительнее использовать материал с высоким значением объёмной теплоёмкости, а также низким коэффициентом линейного расширения. Также было показано увеличение пороговых полей $B_{\text{ком}}$ и $B_{\text{тен}}$ при уменьшении удельного сопротивления однородного проводника.

Отдельно рассматривается влияние поверхностной модификации проводящего материала, когда удельное сопротивление задаётся в виде пространственного профиля:

$$\rho(x, t) = \rho^* [\gamma(x) + k_\rho T(x, t)], \quad \gamma(x) = 1 + \gamma_0 \exp \left[- \left(\frac{x}{\delta_M} \right)^{N_\gamma} \right], \quad (2)$$

где ρ^* — начальное удельное сопротивление вдали от модифицированной поверхности, γ_0 и δ_M — «амплитуда» и эффективная глубина модификации, соответственно, $N_\gamma \geq 1$ — параметр, характеризующий резкость перехода на границе модифицированного слоя. Значение $N_\gamma = 1$ соответствует достаточно плавному экспоненциальному изменению удельного сопротивления. С увеличением N_γ зависимости

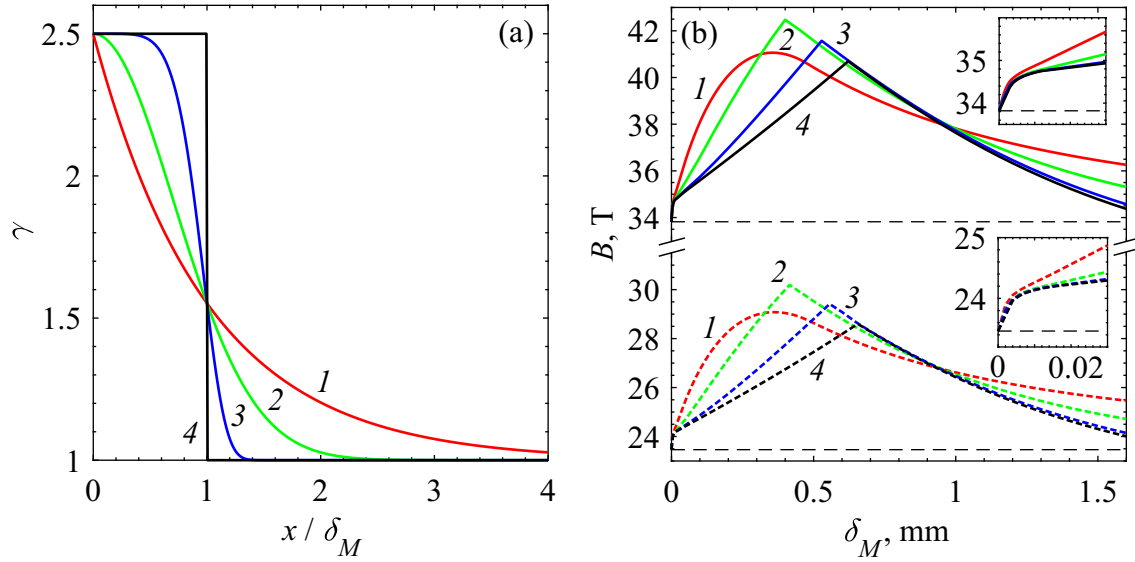


Рис. 1. (a) — Профили γ , определяющие начальное удельное сопротивление материала (2). (b) — зависимости магнитного поля B_{com} (штрих. линии) и B_{ten} (сплошн. линии) от глубины модификации δ_M . Кривые построены для значений: линия 1 — $N_\gamma = 1$, 2 — $N_\gamma = 2$, 3 — $N_\gamma = 6$, 4 — ступенчатый профиль ($N_\gamma \rightarrow \infty$). Параметр $\gamma_0 = 1.5$. Горизонтальные штрих. линии соответствуют однородному материалу ($\gamma_0 = 0$).

$\gamma(x)$ приобретают более резкий характер вплоть до ступенчатого профиля, который формально соответствует $N_\gamma \rightarrow \infty$ (рис. 1a).

Результат применения высокорезистивного профиля для повышения амплитуды генерируемого без разрушения по хрупкому типу B_{com} и по механизму малоциклового усталости магнитного поля B_{ten} показан на рис. 1b. Зависимости пороговых полей от глубины модификации δ_M демонстрируют немонотонный характер с максимумами при некоторой оптимальной глубине модифицированного слоя δ_{max} . Видно, что при амплитуде модификации $\gamma_0 = 1.5$ наиболее эффективен профиль с промежуточной резкостью, характеризуемый значением $N_\gamma = 2$. В главе подробно описано влияние такого профиля на распределения плотности тока, температуры и напряжений в сравнении с однородным материалом. Поверхностная модификация высокорезистивным профилем приводит к перераспределению нагрева на два равных температурных максимума на поверхности и в глубине материала, в области немного дальше от границы $x = 0$ чем δ_{max} . Такая модификация позволяет увеличить пороговое поле B_{com} с 23.5 до 30.2 Тл и B_{ten} с 33.8 до 42.5 Тл, т. е. примерно 29 и 26 %, соответственно, относительно однородного материала.

В третьей главе исследована диффузия аксиального магнитного поля в одиночный толстый цилиндрический проводник, пренебрегая краевыми эффектами. Основное отличие процессов в этой геометрии и в плоском проводнике в том, что при той же амплитуде импульса магнитного поля плотность тока вблизи внутренней (рабочей) поверхности оказывается заметно выше, что приводит к большему нагреву и напряжениям в этой зоне. Математически это обусловлено

наличием членов пропорциональных r^{-1} в уравнениях для описания магнитного поля и напряжений. По этой же причине при применении высокорезистивного профиля с оптимальными параметрами допустимый нагрев на поверхности будет несколько меньше, чем в глубине материала. Эффект приповерхностного увеличения плотности тока и напряжений особенно усиливается при малых значениях внутреннего радиуса, меньше толщины скин-слоя δ (3), которая в рассмотренных условиях составляет около 1.6 мм.

Для цилиндрического проводника были получены аналитические оценки температур аналогичных строгим выражениям для плоского проводника T_{com}^x и T_{ten}^x (1), приводящих к возникновению пластических деформаций на стадии нагрева под действием сжимающих напряжений T_{com}^r и во время охлаждения под действием растягивающих напряжений T_{ten}^r :

$$\begin{aligned} T_{\text{com}}^r &= \frac{1 - \nu}{E\beta_V} \frac{\sigma_y(T_{\text{com}}^r)}{\sqrt{m^2(\nu^2 - \nu + 1) + m(1 + \nu) + 1}}, \\ T_{\text{ten}}^r &= \frac{1 - \nu}{E\beta_V} \frac{\sigma_y(T_{\text{ten}}^r) + \sigma_y(0)}{\sqrt{m^2(\nu^2 - \nu + 1) + m(1 + \nu) + 1}}, \\ m &= \frac{R_1\delta}{R_1^2 + (1 - 2\nu)R_2^2}, \quad \delta = \sqrt{\frac{\tau_s\rho(T)}{\pi\mu}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы проводника, τ_s – период импульса синусоиды, μ – магнитная постоянная. Несмотря на то, что выражения (3) представляют собой аналитическую оценку, определяемые ими значения пороговых температур хорошо согласуются с результатами численного расчёта (рис. 2), а также в пределе больших радиусов R_1 и R_2 переходят в строгие выражения для соответствующих величин T_{com}^x и T_{ten}^x в плоской геометрии.

Способы повышения стойкости, рассмотренные в предыдущей главе, были проанализированы и для цилиндрического проводника. Ввиду того, что плоская геометрия является хорошим приближением описания цилиндрического проводника при малой глубине диффузии, многие из сделанных в главе 2 выводов справедливы для обеих геометрий. В частности, рекомендации по использованию длинных, с периодом более 50 мкс быстрозатухающих импульсов, материалов с высоким значением объёмной теплоёмкости и низким удельным сопротивлением и коэффициентом линейного расширения. Однако отмеченное выше отличие цилиндрического проводника, заключающееся в заметно большей концентрации тока и напряжений в приповерхностной области, приводит к заметному снижению амплитуды импульсного магнитного поля, выдерживаемого материалом, особенно при внутренних радиусах меньших толщины скин-слоя. А также требует использования высокорезистивных профилей модификации меньшей про-

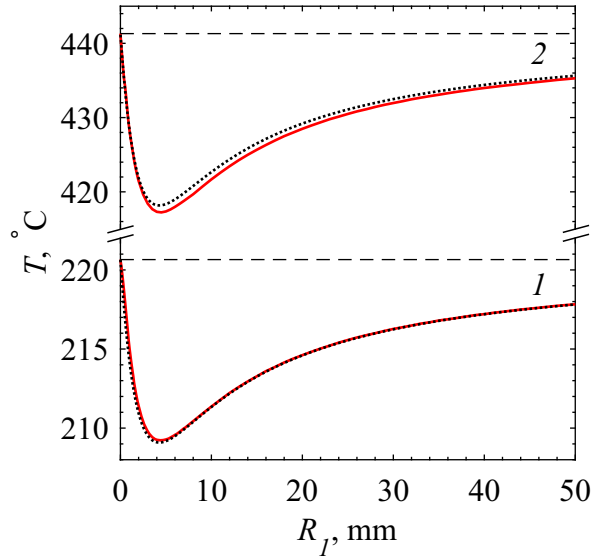


Рис. 2. Температуры, достижение которых приводит к разрушению по хрупкому типу T_{com}^r (линии 1) и по механизму малоциклового усталости T_{ten}^r (линии 2), соответственно, в зависимости от внутреннего радиуса проводника R_1 . Сплошн. линии показывают результат численного расчёта, пункт. линии — аналитические оценки (3). Горизонтальные штрих. линии соответствуют плоскому пределу $R_1 \rightarrow \infty$, т. е. ур. (1).

тяжённости. Так кривые, изображённые на рис. 1b, качественно остаются такими же, однако максимумы достигаются при меньших толщинах δ_{max} . Например, наиболее оптимальный профиль с параметрами $N_\gamma = 2$, $\gamma_0 = 1.5$ для цилиндрической геометрии даёт наилучший результат при глубине модификации 0.3 вместо 0.4 мм. Величина порогового поля B_{ten} при этом увеличивается с 30.3 до 37.8 Тл, что составляет примерно 25 %, т. е. эффект оказывается почти таким же как и для плоского проводника. Для поля B_{com} параметры оптимального профиля при амплитуде модификации $\gamma_0 = 1.5$ совпадают с результатами для B_{ten} . Увеличение поля B_{com} при этом происходит с 21.1 до 27 Тл, что составляет примерно 28 %.

В заключительном разделе главы рассмотрено влияние профилей удельного сопротивления (рис. 1a) не только при амплитуде модификации характерной высокорезистивным сталям $\gamma_0 = 1.5$ (2), но и для больших амплитуд модификации вплоть до $\gamma_0 = 10^9$. Результат такого исследования для порогового поля B_{com} представлен на рис. 3. На нём показано при каких значениях оптимальной глубины модификации δ_{max} будут достигаться максимумы вдоль кривых $B_{\text{com}}(\delta_M)$, которые названы B_{max} , при различных амплитудах модификации γ_0 . В широком диапазоне γ_0 от 10^3 до 10^9 для кривых 1 и 2 достигается более чем двукратное увеличение генерируемого поля. Наилучший результат показывает профиль с параметрами $\gamma_0 = 10^5$, $\delta_{\text{max}} = 4.8$ мм и $N_\gamma = 1$. Пороговое поле разрушения по хрупкому типу при этом увеличивается с 22 до 47 Тл.

В четвёртой главе теоретические модели предыдущих глав, были существенно дополнены. Вместо одиночного проводника в ней представлено модели-

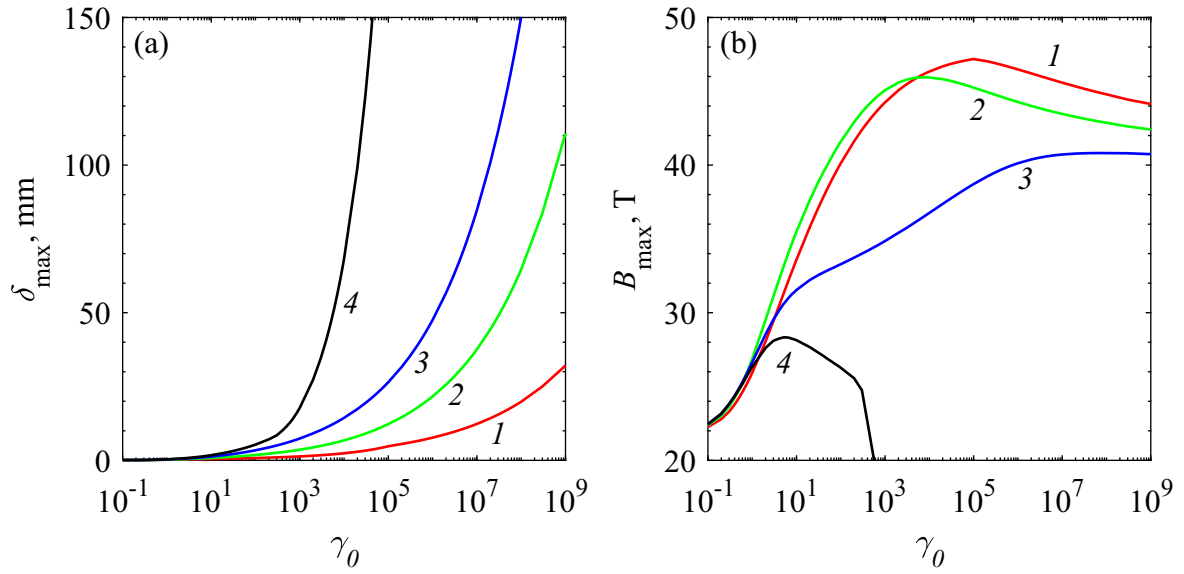


Рис. 3. Зависимости наиболее оптимальной глубины модифицированного слоя $\delta_{\max}$ (a) и максимального значения порогового поля $B_{\max}$ при $\delta_{\max}$ (b) от амплитуды модификации γ_0 . Номера кривых аналогичны рис. 1.

рование индукторной системы из одновиткового соленоида и концентратора магнитного потока в виде двух соосных цилиндрических проводников. Длина внешнего проводника (соленоида) была постоянной, а внутреннего (концентратора) — линейно уменьшалась по мере приближения к оси системы. Распределение магнитного поля в проводниках определялось на основании решения уравнения магнитной диффузии совместно с уравнением динамики RLC-контура, образующего электрическую цепь с концентратором и соленоидом. Расчётные зависимости для полного тока в системе и импульса магнитного поля на внутренней границе концентратора демонстрировали хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными на установке, используемой в ИЭФ УрО РАН.

Модель индукторной системы позволила по-новому оценить эффективность рассмотренных ранее способов повышения стойкости проводника. В особенности подход по оптимизации формы импульса, который в модели осуществлялся за счёт варьирования параметров RLC-контура, а именно собственной индуктивности L_e и сопротивления R_e . Если снижение этих параметров в экспериментальной установке затруднительно, то их увеличение не составляет принципиальной проблемы. Поэтому для анализа влияния параметров L_e и R_e на пороговое поле $B_{\text{тен}}$, мы оценивали его изменение вдоль линейных зависимостей $L_e(R_e)$, определяемых соотношением:

$$L_e(R_e) = L_{e,0} + \alpha \frac{L_{e,0}}{R_{e,0}} (R_e - R_{e,0}), \quad (4)$$

где α — коэффициент пропорциональности, $L_{e,0}$ и $R_{e,0}$ — индуктивность и сопротивление контура, при которых достигалось наилучшее согласие расчёта и экспериментальных данных, полученных на действующей установке. Полученные за-

висимости $B_{\text{тен}}(R_e)$ при значениях α равных 0, 0.5, 1.0 и 1.5 представлены на рис. 4а. Видим, что увеличение сопротивления RLC-контура может существенно повысить значения порогового поля, особенно если это не сопровождается ростом его индуктивности. Наилучший результат достигается при $\alpha = 0$ и $R_e = 9.5R_{e,0}$, что позволяет повысить $B_{\text{тен}}$ на 26 %, с 32.1 до 40.3 Тл. Это связано с тем, что импульс тока, а следовательно и магнитного поля на границе приобретает классический аperiодический вид (рис. 4б), обеспечивающий быстрое затухание.

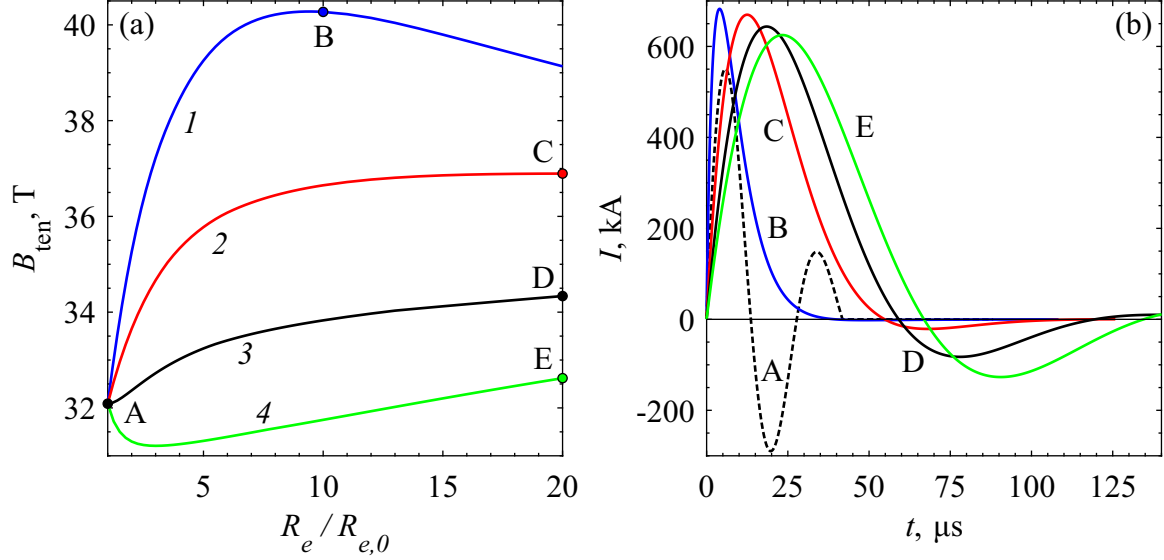


Рис. 4. (а) — зависимость порогового поля $B_{\text{тен}}$ от сопротивления электрического контура R_e вдоль зависимостей $L_e(R_e)$, определяемых (4) с параметром α равным 0 (линия 1), 0.5 (линия 2), 1.0 (линия 3) и 1.5 (линия 4). (б) — временные развертки тока при разряде RLC-контура, соответствующие точкам А–Е.

В рамках анализируемой модели индукторной системы и RLC-контура были подтверждены многие выводы и рекомендации, сделанные в предыдущих главах. В частности, анализ влияния удельного сопротивления на пороговые поля показал, что следует выбирать наименее резистивный материал для проводника. Было подтверждено также, что для повышения стойкости системы необходимо использовать концентраторы с внутренним радиусом R_1 превосходящим толщину скин-слоя. Дальнейшее увеличение параметра R_1 оказывает слабое влияние на уровень безопасно генерируемых магнитных полей. Также было изучено влияние поверхностной модификации при помощи высокорезистивного профиля с $\gamma_0 = 1.5$. Результат был аналогичен предыдущей главе, увеличение порогового поля $B_{\text{тен}}$ составило примерно 30 % с 32 до 41.6 Тл для профиля с параметрами $N_\gamma = 2$, $\delta_{\text{max}} = 0.3$ мм. Кроме того, было показано, что способы повышения стойкости при помощи создания высокорезистивного поверхностного слоя и оптимизации магнитного импульса путём повышения сопротивления контура R_e , будучи почти независимыми, позволяют при совместном использовании увеличить пороговое поле вплоть до 52 Тл.

В пятой главе исследовано влияние неровностей на поверхности цилиндрического проводника в сильном импульсном азимутальном магнитном поле. Аксиально симметричные одиночные неровности на поверхности проводника радиусом R_0 моделировались при помощи соотношения:

$$R(z) = R_0 + \frac{a}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{\pi z}{\lambda} \right) \right), \quad -\lambda \leq z \leq +\lambda, \quad (5)$$

с амплитудой $a > 0$ для выступа, и $a < 0$ — для сужения (рис. 5(a, b)). Также изучались неровности, имитирующие шероховатую поверхность в форме последовательности одинаковых сужений и расширений (рис. 5с), описываемых выражением:

$$R(z) = R_0 + a \cos \left(\frac{\pi z}{\lambda} \right), \quad -\infty < z < +\infty. \quad (6)$$

Параметр λ имеет смысл полуширины неоднородности (5), или полупериода (6). Внешний вид неровностей показан на рис. 5.

Для установившегося синусоидального сигнала тока периодом τ_s было получено и подробно описано распределение плотности тока и мощности тепловыделения в проводнике. Параметры сигнала и геометрия проводника подбирались характерными экспериментам по электрическому взрыву в скиновом режиме на установке MIG [7] ($R_0 = 1$ мм, $\tau_s = 400$ нс) и на установке GIT [13] ($R_0 = 2$ мм, $\tau_s = 8$ мкс). MIG-условия экспериментов соответствуют толщине скин-слоя $\delta \approx 40$ мкм, GIT-условия — $\delta \approx 180$ мкм (3). Ввиду моделирования начальной стадии нагрева проводника, когда изменением удельного сопротивления с температурой можно пренебречь, в этой главе решалось только уравнение магнитной диффузии, но не в одномерной, как в предыдущих главах, а в двумерной постановке.

Влияние неровностей на стойкость проводника оценивалось при помощи средней за период мощности тепловыделения. Рис. 5 наглядно показывает изменение её пространственного распределения по сравнению с тепловыделением на поверхности идеально гладкого проводника. При одних и тех же размерах неоднородностей a и λ зона повышенной мощности тепловыделения достигает наибольших размеров для одиночного сужения, несколько меньших для сужений периодической неровности и наименьших в окрестностях выступа. Повышение мощности тепловыделения соответствует сгущению линий тока, приведённых на рисунке в момент достижения максимума синусоидального сигнала.

Проведённый анализ амплитуды мощности тепловыделения показал, что наибольшее её значение $\Omega_{\max}$ всегда наблюдалось на поверхности проводника: в центре сужений и по краям выступа. Рис. 6 показывает, как изменяется амплитуда мощности тепловыделения $\Omega_{\max}$ для двух условий MIG и GIT по сравнению с аналогичной величиной на поверхности идеально гладкого проводника $\Omega_{0,\max}$ для

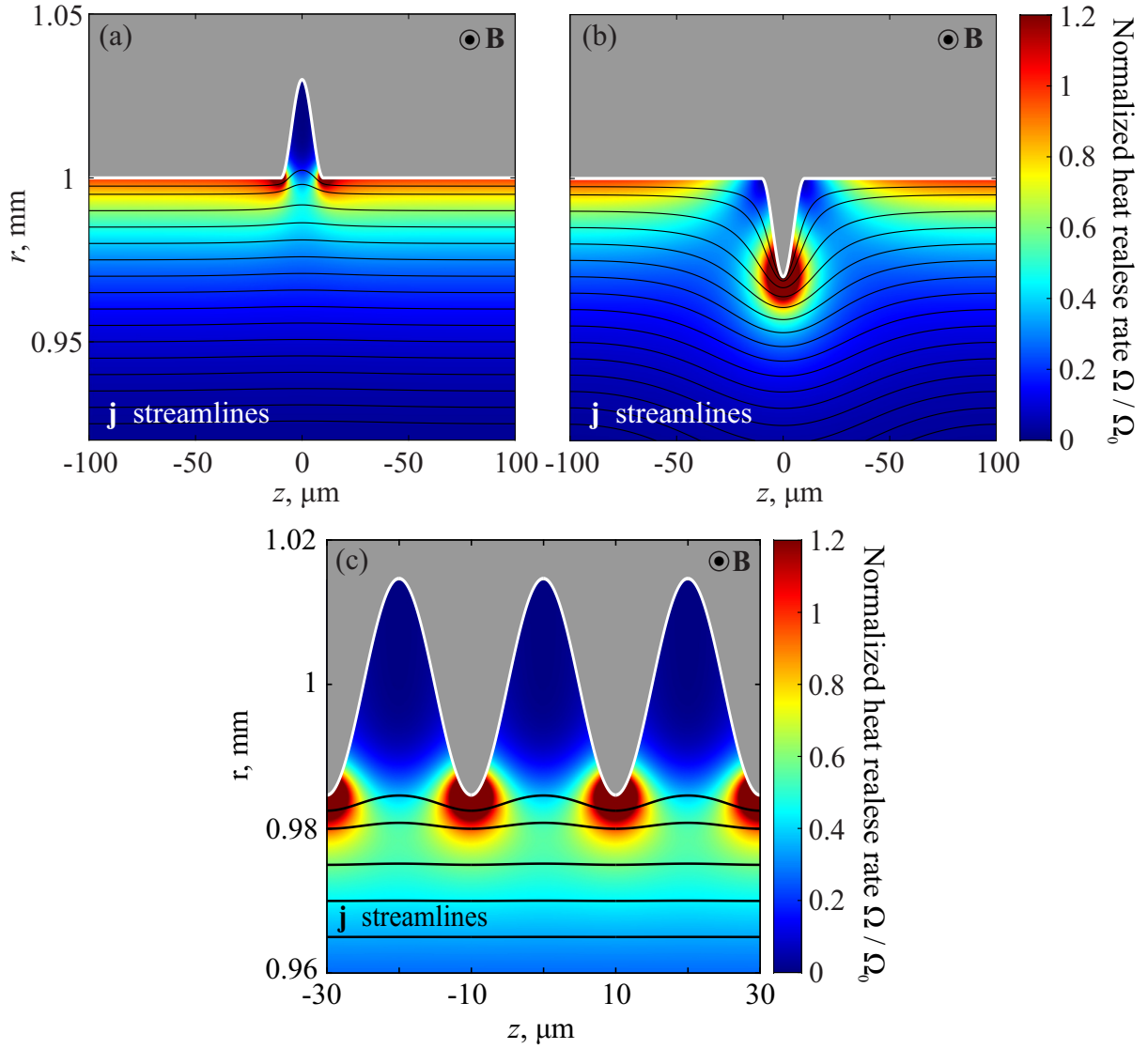


Рис. 5. Распределение усредненной за период мощности тепловыделения по сечению проводника в окрестности одиночной поверхностной неровности в виде расширения (a), сужения (b) и периодической шероховатости (c), а также линии тока в момент $\omega t = \pi/2$ (максимум полного синусоидального тока). Параметры расчета: $\lambda = 10$ мкм, $a = 30$ мкм, $R_0 = 1$ мм, $\tau_s = 0.4$ мкс.

разных типов неровностей. При фиксированной ширине неровности $\lambda = 10$ мкм и варьировании её амплитуды (рис. 6a), наиболее быстрое возрастание примерно по квадратичному закону демонстрирует одиночное сужение. Периодическая шероховатость во всём рассмотренном диапазоне сохраняет близкий к линейному рост. Полученный результат при малых значениях амплитуд оказывается близким результатам теоретического анализа, представленного в работе [8]. Наименьшее усиление мощности тепловыделения наблюдается для одиночного выступа, однако оно не является пренебрежимо малым. Так для неровности с $a = \lambda = 10$ мкм усиление составляет 2.6-2.7 раз в зависимости от моделируемых условий.

На рис. 6b показана мощность тепловыделения при изменении размеров неровности с сохранением равенства $\lambda = a$. Данный случай интересен с практической точки зрения, поскольку разумно предположить, что обработка поверхности с

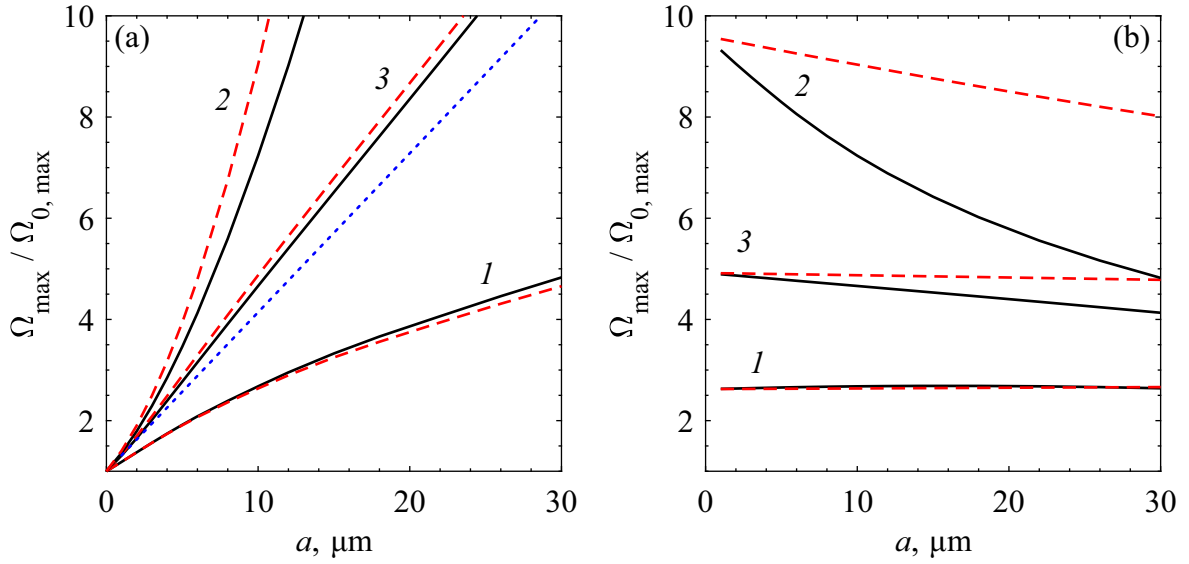


Рис. 6. Максимальное значение усредненной за период мощности тепловыделения $\Omega_{\max}$, нормированной на соответствующее значение на поверхности гладкого провода, в зависимости от амплитуды неровности для одиночного расширения (линии 1), сужения (линии 2), и периодической шероховатости (линии 3). Параметры расчетов: (a) – $\lambda = 10$ мкм, (b) – $\lambda = a$; сплошн. линии – $R_0 = 1$ мм, $\tau_s = 0.4$ мкс, $\delta = 40$ мкм; штрих. линии – $R_0 = 2$ мм, $\tau_s = 8$ мкс, $\delta = 180$ мкм. Пункт. линия (a) показывает асимптотику для малых амплитуд a из работы [8].

целью уменьшения её шероховатости приводит к появлению новых неровностей меньших как по глубине, так и по ширине размеров. Примечательным результатом такой обработки, как показывает рис. 6b, является полное отсутствие какого-либо положительного эффекта для стойкости проводника, т. к. максимум локальной мощности тепловыделения не уменьшается, а для неровностей типа сужения может даже существенно возрасти. При этом стоит отметить, что модель не учитывает влияние теплообмена, который оказывает сильное влияние на малых масштабах. Ввиду этого, в областях меньших толщины термического скин-слоя, который примерно на порядок меньше, чем классическая толщина скин-слоя δ , для сплошных линий при $\lambda = a < 4$ мкм и для штриховых линий при $\lambda = a < 18$ мкм результаты могут давать завышение. Дальнейшее уточнение и изучение влияния неровностей является объектом будущих исследований.

Основные результаты и выводы

В диссертации проведено систематическое исследование процессов магнитной диффузии и возникающих термомеханических напряжений в плоском и цилиндрическом проводнике. Перечислены основные способы повышения стойкости проводника. Под стойкостью понимается способность материала выдерживать без разрушения термомеханические нагрузки, создаваемые в нём сильным импульсным магнитным полем. Представим основные результаты, полученные в работе:

1. В рамках модели идеального упруго-пластического тела с произвольной температурной зависимостью предела текучести получены аналитические выражения для температуры, инициирующей разрушение плоского проводника по хрупкому типу и по механизму малоциклового усталости, а также предложены аналоги этих выражений для цилиндрического проводника.
2. Показано, что для повышения стойкости проводника предпочтительно использование быстрозатухающих импульсов или электрического контура, полностью отсекающего протекание тока после первого полупериода колебаний. В имитирующей экспериментальную установку модели одновиткового соленоида с концентратором, подключённых к RLC-контур, достигалось повышение амплитуды индукции магнитного поля до 25 % при помощи увеличения электрического сопротивления контура без изменения его индуктивности.
3. Обнаружено, что формирование высокорезистивного поверхностного слоя в проводнике позволяет существенно повысить его стойкость в сильном импульсном магнитном поле. При использовании профиля удельного сопротивления в 2.5 раза превышающего соответствующее значение в глубине материала, что характерно для высокорезистивных сталей, эффект увеличения амплитуды индукции магнитного поля составил 25-30 %. Использование же экспоненциально спадающего профиля удельного сопротивления с увеличением резистивности в диапазоне 10^3 - 10^9 позволяет увеличить амплитуду индукции магнитного поля безопасную для материала проводника более чем в 2 раза вплоть до 47 Тл.
4. Показано, что приведённые выше подходы по оптимизации электрического контура путём повышения его активного сопротивления и использованию модифицированного поверхностного слоя с удельным сопротивлением близким высокорезистивным сталям будучи слабо зависимыми при совместном использовании позволяют достигать высокие магнитные поля без угрозы разрушения материала вплоть до 52 Тл.
5. Установлено, что наиболее значимыми для повышения стойкости проводника характеристиками материала являются малые значения коэффициента линейного расширения, высокая объёмная теплоёмкость и низкое удельное сопротивление. Снижение последнего при постоянстве других параметров имеет перспективу повышения безопасного для материала генерируемого магнитного поля до 25 %.

6. Обнаружено, что стойкость цилиндрических проводников с внутренним радиусом меньшим толщины скин-слоя в сильных магнитных полях резко снижается. При радиусах, превышающих толщину скин-слоя, выдерживаемая проводником амплитуда магнитного поля изменяется слабо.
7. Для цилиндрического проводника в азимутальном магнитном поле показано многократное усиление мощности тепловыделения в окрестности аксиально-симметричных неровностей на поверхности. Их влияние на стойкость, расположенное по убыванию: неровность в форме одиночного сужения, периодической шероховатости и одиночного выступа.
8. Обнаружено, что уменьшение шероховатости поверхности проводника при сохранении соотношения амплитуды и полуширины неровностей вплоть до размеров, сопоставимых с толщиной термического скин-слоя, не снижает ожидаемый нагрев для любого типа неровности. Таким образом, шлифовка поверхности может не приводить к повышению стойкости в сильных магнитных полях.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Русских, П. А. Повышение стойкости концентратора магнитного потока при генерации сильных импульсных магнитных полей / П. А. Русских, Г. Ш. Болтачев // МНИЖ. – 2025. – Т. 155. – № 5. – С. 1-12.
2. Russkikh, P. A. Increasing the threshold amplitude of the pulsed magnetic field causing irreversible deformation of a steel inductor / P. A. Russkikh, G. S. Boltachev // Russ. Phys. J. – 2025. – V. 68. – No. 2. – P. 333–340.
3. Boltachev, G. Sh. Enhanced Joule heat release at surface irregularities / G. Sh. Boltachev, P. A. Russkikh, S. A. Chaikovsky // Curr. Appl. Phys. – 2024. – V. 68. – P. 189-195.
4. Русских, П. А. Способы повышения предельного импульсного магнитного поля, вызывающего разрушение стального индуктора при многократном воздействии / П. А. Русских, Г. Ш. Болтачев, С. Н. Паранин // Изв. РАН. Сер. физ. – 2023. – Т. 87. – № 11. – С. 1534-1540.
5. Русских, П. А. Хрупкое разрушение проводника в сильном импульсном магнитном поле / П. А. Русских, Г. Ш. Болтачев, С. Н. Паранин // ЖТФ. – 2023. – Т. 93. – № 5. – С. 654-665.
6. Simulating the conductor with a nonuniform resistance under high-pulsed magnetic fields / P. A. Russkikh et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2021. – V. 49. – No. 9. – P. 2463-2469.

Статьи в сборниках трудов конференций

1. Russkikh, P. A. A conductor with space-variable resistivity under high pulsed magnetic field / P. A. Russkikh, G. S. Boltachev, S. N. Pararin // AIP Conf. Proc. – 2020. – V. 2313. – No. 030028. – P. 1-6.
2. Durability of inductor material with inhomogeneous resistance under high pulsed magnetic field generation / P. Russkikh et al. // Proceedings of 21st Int. Symp. on High-Current Electronics. – Tomsk, Russia, 2020. – P. 154-159.

Список цитированной литературы

- [1] Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля: методы генерации и физические эффекты, связанные с созданием импульсных полей мегаэрс-тедного диапазона / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 392 с.

- [2] Magnetic pulsed compaction of nanosized powders / G. Sh. Boltachev et al. — NY: Nova Science Publishers, 2010. — 86 p.
- [3] Крутиков, В. И. Сварка стальных деталей и прессование иридиевых нанопорошков посредством сжатия проводящих оболочек в импульсных магнитных полях. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук. 2020.
- [4] Динамика цилиндрических проводящих оболочек в продольном импульсном магнитном поле / Г. Ш. Болтачев и др. // ЖТФ. — 2010. — Т. 80. — № 6. — С. 1-6.
- [5] The impact of local current density increase on conductor destruction / S. I. Krivosheev et al. // J. Phys. Conf. Ser. — 2019. — V. 1147. — P. 012033.
- [6] Шнеерсон, Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов / Г. А. Шнеерсон. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 416 с.
- [7] Peculiarities of an electrical explosion of flat conductors in the current skinning mode / S. A. Chaikovskii et al. // Russ. Phys. J. — 2019. — V. 62. — P. 1235–1242.
- [8] Use of hydrodynamic theory to estimate electrical current redistribution in metals / E. P. Yu et al. // Phys. Plasmas. — 2020. — V. 27. — No. 5. — P. 052703.
- [9] Карпова, И. М. Минимизация максимального локального нагрева проводника в импульсном магнитном поле при использовании слоистой проводящей среды / И. М. Карпова, В. В. Титков // Электричество. — 1999. — Т. 12. — С. 55–60.
- [10] Bryant, A. R. The effect of Joule heating on the diffusion of megagauss fields into metals / A. R. Bryant // Proceedings of the International conf. on megagauss magnetic field generation by explosives and related experiments, edited by H. Knoepfel and F. Herlach. — Brussel. 1966. — P. 183-191.
- [11] Sedov, L. I. Mechanics of Continuous Media / L. I. Sedov. — Singapore: World Scientific, 1997. — 1368 p.
- [12] Карпова, И. М. Анализ напряженного состояния одновиткового биметаллического соленоида в сильном импульсном магнитном поле / И. М. Карпова, В. В. Титков // ПМТФ. — 1988. — Т. 30. — № 5. — С. 13-20.
- [13] Generation of magnetosonic waves by electrical explosion of conductors driven by mega-ampere current pulses / V. I. Oreshkin et al. // Phys. Plasmas. — 2023. — V. 30. — P. 113508.