

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Покровский Сергей Владимирович

**Локальные и макроскопические магнито-транспортные  
характеристики высокотемпературных сверхпроводящих композитов**

Специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: Руднев Игорь Анатольевич,  
доктор физико-математических наук, доцент, профессор  
отделения лазерных и плазменных технологий офиса  
образовательных программ (412) НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:  
Гохфельд Денис Михайлович, доктор ф.-м.н., старший  
научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук -  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,  
лаборатории Сильных магнитных полей  
Кузьмичев Николай Дмитриевич, доктор ф.-м.н., профессор  
Рузаевского института машиностроения (филиала) ФГБОУ  
ВО «Национальный исследовательский Мордовский государ-  
ственный университет им. Н.П. Огарева», кафедры Конструк-  
торско-технологической информатики  
Дегтяренко Павел Николаевич, кандидат ф.-м.н., старший  
научный сотрудник Объединенного института высоких  
температур Российской академии наук (ОИВТ РАН),  
лаборатории №2.2. - сверхпроводниковых устройств и  
преобразовательной техники

Защита состоится «29» июня 2022 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета  
МИФИ.01.02 НИЯУ МИФИ по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте  
<https://ds.mephi.ru>.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба  
направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, ученому секретарю  
диссертационного совета МИФИ.01.02.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года

Ученый секретарь диссертационного совета  
МИФИ.01.02,  
доктор физико-математических наук, доцент



Руднев Игорь Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

История изучения явления сверхпроводимости и развития сверхпроводящих материалов длится уже более 100 лет. За это время произошло несколько качественных скачков в понимании явления и создании сверхпроводящих материалов. Одной из важнейших характеристик является критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние ( $T_c$ ). Самые значительные и очень важные достижения произошли в 1986-1987 годах и связаны они с открытием соединений  $(LaBa)_2CuO_4$  [1] с критической температурой 35К и позднее системы  $Y-Ba-Cu-O$  с  $T_c = 93К$  [2]. Появление таких материалов явилось началом развития высокотемпературной сверхпроводимости, то есть, в отличие от всех известных до того сверхпроводников, переход в сверхпроводящее состояние может быть осуществлен с помощью жидкого азота (температура кипения при нормальных условиях 77.4К). Это явилось важным фактором для активизации поиска и исследований высокотемпературных сверхпроводящих материалов. Другой важной проблемой явилась необходимость повышения плотности критического тока (на практике важнее оказывается инженерная плотность тока, то есть в расчете на сечение всей композитной ленты, а не только сверхпроводника), поскольку в таких областях техники как энергетика, медицинская техника, транспорт, тяжелая промышленность сверхпроводники соперничают, прежде всего, с традиционными электротехническими материалами, такими как медь.

Кроме токонесущей способности важной характеристикой для применений являются механические параметры материалов. В частности возможности выдерживать изгибные нагрузки и деформации растяжения.

Новым стимулом для разработок явилось создание в середине 90-х годов ВТСП проводов 1-го поколения (многожильные провода на основе керамик в серебряной оболочке, изготавливаемые по методу «порошок в трубе»). ВТСП провода первого поколения уже работали при азотных температурах. Однако эксплуатационные характеристики устройств на ВТСП проводах 1-го поколения (1G) при температуре жидкого азота были относительно низкими, а их стоимость - неоправданно высокой, главным образом, из-за использования дорогостоящей матрицы (1кА м ВТСП провода 1-го поколения в десятки раз превышает стоимость 1кА·м медного проводника).

Фактически параллельно с технологией «порошок в трубе» ведущими учеными и технологами разрабатывалась методика получения высокотемпературных пленок на гибких металлических подложках. Для получения пленок используются различные методы напыления. В настоящее время наиболее развитой и массовой является лазерное напыление.

Налажено промышленное производство ВТСП лент второго поколения, длина единичных кусков превышает 1000 м.

Композитные ВТСП ленты (2G) обеспечивают безусловную экономическую выгоду. Они имеют при азотной температуре высокие эксплуатационные характеристики (плотность критического тока и рабочее магнитное поле), а их стоимость, при промышленном выпуске, незначительно выше стоимости медного проводника.

Сверхпроводящие ленты на основе иттриевой керамики представляют собой сложные композитные слоистые структуры, технология производства которых включает в себя более двух десятков различных технологических процессов, каждый из которых может приводить к возникновению дефектных областей в ВТСП пленке, в которых локальный критический ток оказывается значительно ниже, чем во всей ленте. Эти области лимитируют токонесущую способность ленты, при этом ухудшается эффективность использования ВТСП ленты/провода, а зачастую приводит к повреждению дорогостоящего криогенного оборудования.

Таким образом, при производстве и использовании композитных ВТСП проводов становится острым вопрос аттестации лент/проводов без разрушения их структуры (например, резка на куски длинных проводов или/и изготовление контактов, и т.д.). Кроме того, возможность обнаружения локальных областей неоднородности критического тока дает возможность разрабатывать методы улучшения характеристик дефектных участков (залечивания), что приведет к улучшению характеристик всего провода.

Поэтому разработка бесконтактных методик исследования магнитных и транспортных характеристик ВТСП композитов и выявление закономерностей их поведения, при наличии областей с неоднородным разделением тока, является актуальной задачей как для развития и усовершенствования методов получения композитных ВТСП лент, так и для эффективного и безопасного использования сверхпроводников в различных областях техники.

Актуальность таких исследований подтверждается выполнением ряда государственных контрактов и договоров, финансируемых Росатомом, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 - 2012 годы», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», Российского фонда фундаментальных исследований, в рамках которых были получены результаты диссертационной работы.

**Цель диссертационной работы:** заключается в установлении физических механизмов, определяющих формирование и взаимосвязь локальных и макроскопических магнито-транспортных характеристик высокотемпературных сверхпроводящих композитов.

### **Для выполнения поставленной цели были решены следующие задачи:**

- Разработан низкотемпературный сканирующий холловский магнитометр, предназначенный для исследования пространственного распределения магнитных и транспортных характеристик ленточных ВТСП композитов.
- Разработана и реализована методика расчета на основе решения обратной задачи Био-Савара-Лапласа двумерного распределения критического тока ленточных ВТСП композитов из экспериментальных данных пространственного распределения магнитного поля.
- Исследованы локальные токонесущие характеристики ВТСП композитов, в том числе после воздействий различной природы. Установлены корреляции локальных и макроскопических магнито-транспортных характеристик.
- Исследованы и установлены механизмы локального повышения токонесущих характеристик ВТСП композитов с помощью ультракороткого лазерного воздействия.
- Выполнено масштабирование экспериментальных подходов и методик для аттестации длинномерных (100 и более метров) ВТСП композитов.

### **Научная новизна.**

- Впервые разработана и практически реализована комплексная методика исследования локальных токонесущих характеристик ВТСП композитов на основе измерений холловской магнитометрии и последующего решения задачи инверсии закона Био-Савара-Лапласа.
- Впервые установлено увеличение (до 49%) локального критического тока ВТСП композитов с помощью ультракороткого лазерного воздействия, приводящего к созданию дополнительных центров пиннинга.
- Впервые установлено влияние макроскопических дефектов на локальные магнитные и транспортные характеристики ВТСП композитов, в том числе при воздействиях различной природы.
- Впервые разработана и реализована установка для исследования распределения критического тока в длинномерных ВТСП композитах. Получен патент RU121940U1 на магнитометрическую линейку датчиков Холла, используемую в измерительной части экспериментальной установки.

**Практическая значимость работы:** результаты диссертационной работы могут быть использованы для создания полного комплекса оборудования по аттестации и локальному

улучшению ВТСП композитов в единой технологической цепочке, а также при создании электротехнических устройств с элементами намотки сверхпроводящей ленты, таких как сверхпроводящие магниты, сверхпроводящие вращающиеся машины и др. На основе разработанных методик были созданы лабораторные работы и учебные стенды, которые используются при проведении практических занятий в рамках учебных курсов в НИЯУ МИФИ. Результаты работы были использованы совместно с компанией СуперОкс (Россия) для разработки и внедрения бесконтактной системы контроля качества длинномерных ВТСП лент второго поколения, в НИЯУ МИФИ - для разработки и создания магнитной системы с двухсекционным высокотемпературным сверхпроводящим магнитом на основе ВТСП лент (получен патент RU171954U1), бесконтактного магнитного подшипника с обмоткой из высокотемпературных сверхпроводящих лент (получен патент RU197 418U1).

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

- Комплексная методика определения двумерного распределения тока в ВТСП композитах на основе решения задачи инверсии Био-Савара-Лапласа
- Установленные топологические картины двумерного протекания тока при наличии макроскопических дефектов различного типа.
- Установленная динамика процесса формирования дефектов протекания тока в сверхпроводящих композитах с различной архитектурой при увеличении деформаций изгиба, заключающаяся в формировании множественных областей с пониженным критическим током на подложке Ni-W и резком падении локального критического тока на уединенных участках композита при достижении критических деформаций в случае подложки Hastelloy, что объяснено различием в архитектуре ВТСП композита и прочностными характеристиками материала подложки.
- Определенные критические параметры деформаций, приводящие к необратимым повреждениям сверхпроводящего слоя, зависящие от способа приложения изгибных деформаций.
- Увеличение на 49% локальной плотности критического тока сверхпроводящего композита при воздействии ультракоротких лазерных импульсов, приводящих к формированию искусственных центров коллективного пиннинга микронного диапазона.
- Выявленные корреляции локального распределения тока и интегральной величины критического тока в длинномерных ВТСП композитах.

**Достоверность научных положений, результатов и выводов.** Достоверность экспериментальных данных подтверждена повторяемостью результатов при выполнении исследований, использованием и сравнением результатов нескольких дополняющих друг друга методик и сопоставлением результатов с известными литературными данными. Полученные результаты коррелируют с известными результатами других авторов.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ведущих профильных научных российских и международных конференциях: 25 Международная конференция по физике низких температур (LT25, 2008, Амстердам, Нидерланды), III Международный форум по нанотехнологиям (2010, Москва, Россия), Конференция столетия сверхпроводимости (2011, Гаага, Нидерланды), 11-я Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (EUCAS 2013, Генуя, Италия), Конференция по прикладной сверхпроводимости (ССА 2014, 2014, Чеджу, Корея), Научная сессия НИЯУ МИФИ (НИЯУ МИФИ-2014, Москва, Россия), 12-я Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (EUCAS 2015, 2015, Лион, Франция), 13-я Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (EUCAS 2017, 2017, Женева, Швейцария), II International Conference on Laser and Plasma Researches and Technologies (2018, Москва, Россия), 32-й Международный симпозиум по сверхпроводимости (ISS 2019, 2019, Киото, Япония).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 печатная работа в российских и зарубежных рецензируемых изданиях: из них 5 входят в Перечень ВАК, 16 входят в базы Web of Science и Scopus, зарегистрирован 1 патент.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и библиографии. Работа изложена на 157 страницах, содержит 120 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 123 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** выполнено обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, а также положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** проведен литературный обзор. Представлен анализ методов исследования локальных магнитных и транспортных характеристик ВТСП композитов. Описаны подходы к восстановлению пространственного распределения тока в сверхпроводящих композитах. Проведен краткий обзор методик управляемой модификации сверхпроводящих композитов и локального повышения критического тока. В заключении

главы приводится обоснование выбора основной методики исследования, а также перспективность использования лазерного облучения для управления магнитными и токонесущими характеристиками ВТСП композитов.

Вторая глава посвящена анализу намагничивания ВТСП композитов и особенностям протекания локального тока в сверхпроводнике. На основе решения уравнения Фарадея с привлечением двухэкспоненциальной модели было показано, что вплоть до поля полного проникновения, возникающие сверхпроводящие токи носят двумерный характер, и возникающие распределения магнитного поля и тока соответствуют модели критического состояния. Это позволяет рассматривать обратную задачу как двумерную, поэтому для восстановления локального распределения тока в сверхпроводнике достаточно измерить только одну компоненту магнитного поля, перпендикулярную поверхности композита.

Представлено описание методики измерения пространственного распределения захваченного магнитного потока композитных ВТСП лент с помощью сканирующей холловской магнитометрии. Чувствительность датчика Холла 90-120 мкВ/мТл, шаг сканирования до 0.01 мм, скорость сканирования 2 см/с, точность измерения поля – 2 %. Приведены схемы измерительной системы, на рисунке 1 представлен общий вид экспериментальной установки. При разработке методики рассмотрены режимы намагничивания сверхпроводника (полное и неполное проникновения потока), определены области локальной чувствительности в разных режимах проникновения потока.

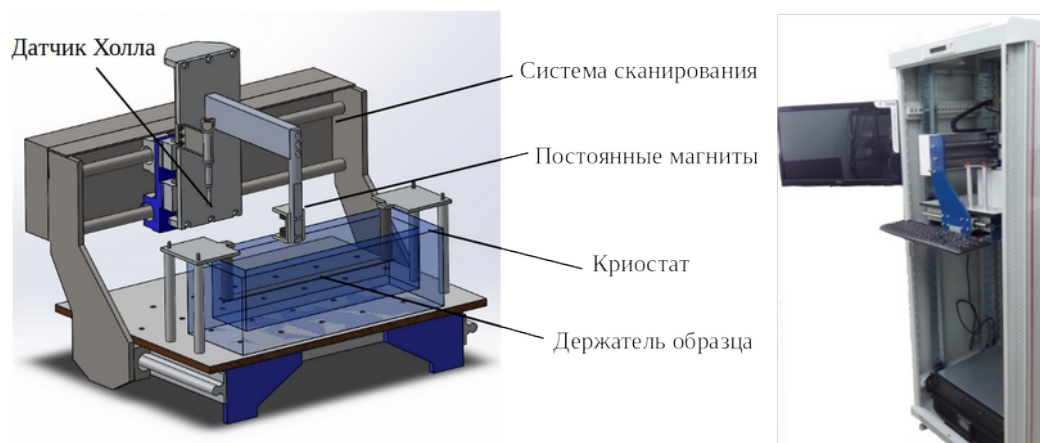


Рисунок 1 - Экспериментальный стенд для исследования захваченного магнитного потока ВТСП композита

Дано описание разработанной методики определения двумерного распределения тока в ВТСП композитах. В её основе лежит решение обратной задачи инверсии Био-Савара-Лапласа (1) с использованным доопределением магнитного поля вне сверхпроводника, итерационной процедуры, прямого и обратного преобразования Фурье. При этом не



вносится. При этом не вносятся никаких предположений о распределении токов, что позволяет рассматривать гораздо более сложные геометрии, определять токовые пути и дефектные области в образцах.

$$B_z(r) = \mu_0 H_0 + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{j_x(r')(y-y') - j_y(r')(x-x')}{|r-r'|^3} d^3 r' \quad (1)$$

где распределению захваченного магнитного потока  $B_z(x,y)$  определяется пространственным распределением компонент тока  $\mathbf{j}$  сверхпроводника,  $H_0$  — внешнее магнитное поле (направленно по  $z$ ),  $\mu_0$  — магнитная постоянная, трехмерный радиус – вектор  $r$  имеет координаты  $(x,y,z)$ , а сверхпроводник расположен в плоскости  $XOY$ .

Поскольку линии тока  $\mathbf{j}$  замкнутые  $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ , это позволяет разделить ядро интегрального уравнения и искомую величину, путем введения величины плотности распределения магнитного момента  $g(x,y)$ . Тогда задача примет вид (2):

$$B_z(\vec{r}) - \mu_0 H_0 = \mu_0 \int K_g(\vec{r} - \vec{r}') g(\vec{r}') d^3 r' \quad (2)$$

$$K_g = \frac{1}{4\pi} \frac{2z^2 - (x-x')^2 - (y-y')^2}{|\vec{r} - \vec{r}'|^5}$$

При этом связь токов и распределенного магнитного момента определяется соотношениями:  $j_x(x,y) = \partial g$ . Данная задача относится к классу некорректных задач. Решение задачи инверсии может проводиться разными способами. В главе представлены численные алгоритмы решения задачи восстановления локального распределения тока в режимах намагничивания и пропускания транспортного тока. Приведен алгоритм решения задачи инверсии Био-Савара-Лапласа с использованным доопределением магнитного поля вне сверхпроводника, итерационной процедуры, прямого и обратного преобразования Фурье. Для фурье-образов захваченного магнитного поля  $\tilde{B}_z(k_x, k_y)$  и магнитного момента  $\tilde{g}(k_x, k_y)$  задача имеет вид (3) и (4):

$$\tilde{B}_z(k_x, k_y, z) = \mu_0 \tilde{K}_g(k_x, k_y, z, d) \tilde{g}(k_x, k_y) \quad (3)$$

$$\tilde{K}_g(k_x, k_y, z, d) = \exp(-kz) \sinh\left(\frac{kd}{2}\right), k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

$$\tilde{g} = \frac{\tilde{B}_z}{\mu_0 \tilde{K}_g} \quad (4)$$

Если высота  $z$ , на которой производится измерение магнитного поля образца, меньше толщины пленки  $d$  более чем на 50 % (характерная ситуация при измерении поля магнитооптическими методами), величина  $\tilde{K}_g$  неограниченно растет с увеличением модуля волнового вектора  $k$ , и процедура определения магнитного момента из выражений (3)-(4) является корректной. Малые погрешности  $\tilde{B}_z$  в высокочастотной области не влияют на определяемое значение магнитного момента  $\tilde{g}$ .

Напротив, если высота  $z$ , на которой производится измерение магнитного поля больше толщины пленки  $d$  (характерная ситуация при измерении поля датчиком Холла), величина  $\tilde{K}_g$  стремится к нулю с увеличением модуля волнового вектора  $k$ , и процедура определения магнитного момента из выражения (3)-(4) становится некорректной. Малые погрешности  $\tilde{B}_z$  в высокочастотной области оказывают определяющее влияние на получаемое значение магнитного момента  $\tilde{g}$ , что выражается в сильных высокочастотных пространственных осцилляциях величины  $g(x, y)$ .

Для нахождения корректного решения была использована регуляризация по методу Тихонова для уравнений Фредгольма первого рода [3] с учетом особенностей экспериментальной методики. Вид фильтрующей функции задается формулой (5):

$$W(k) = \frac{\tilde{K}^2}{\tilde{K}^2 + (k/k_{\max})^4} \quad (5)$$

Для подбора параметра  $k_{\max}$  регуляризации и проверки методики выполнено исследование модельных образцов, имитирующих особенности поведения сверхпроводника при намагничивании и протекании транспортного тока. Так как для решения задачи инверсии используется прямое и обратное преобразование Фурье, то для корректного проведения преобразований на двумерной сетке требуется обеспечить периодичность функций на большом участке расчетной сетки. Для этого дополнительно решалась краевая задача Дирихле, а для случая протекания транспортного тока область магнитного поля дополнялась симметрично относительно образца для использования методики расчета, аналогичной случаю наведенных токов.

Используя разработанную методику было проведено восстановление пространственного распределения тока в модельных образцах при наличии токовых дефектов (рисунок 2, 3). Точность восстановления не хуже 5%. Выявлены топологические картины перетекания тока при наличии дефектов. Предложен метод идентификации локальных дефектов по топологии линий уровня компонент тока сверхпроводника.

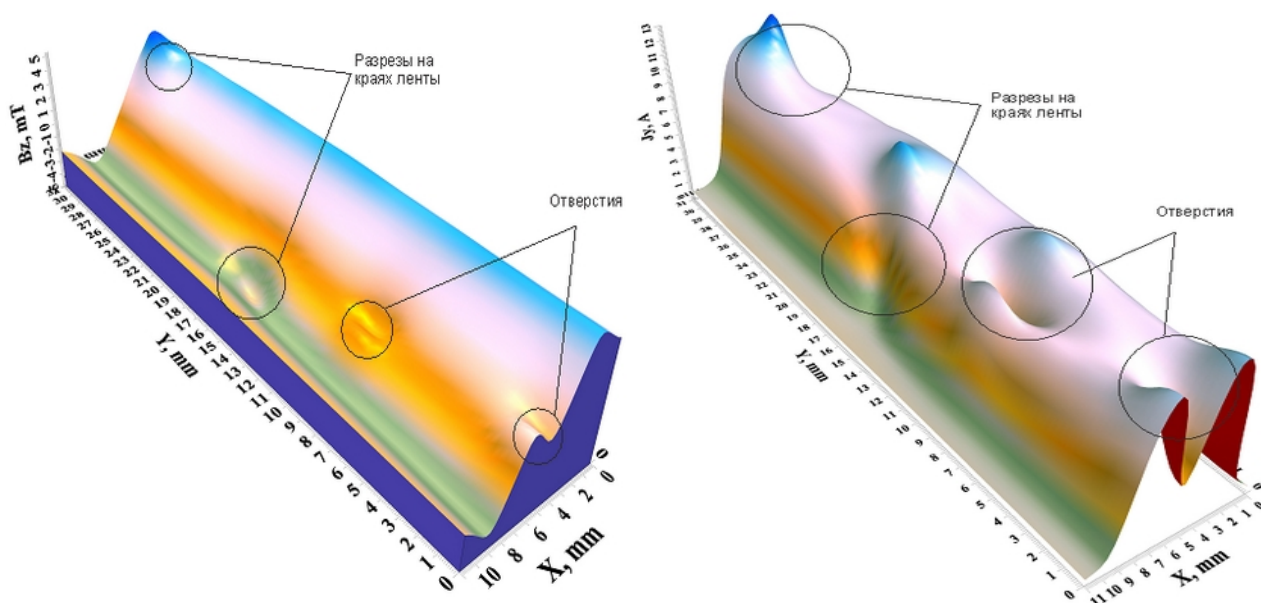


Рисунок 2 – Слева – поверхность распределения магнитного поля медной ленты с искусственными дефектами при протекании транспортного тока, справа – поверхность распределения продольной компоненты транспортного тока

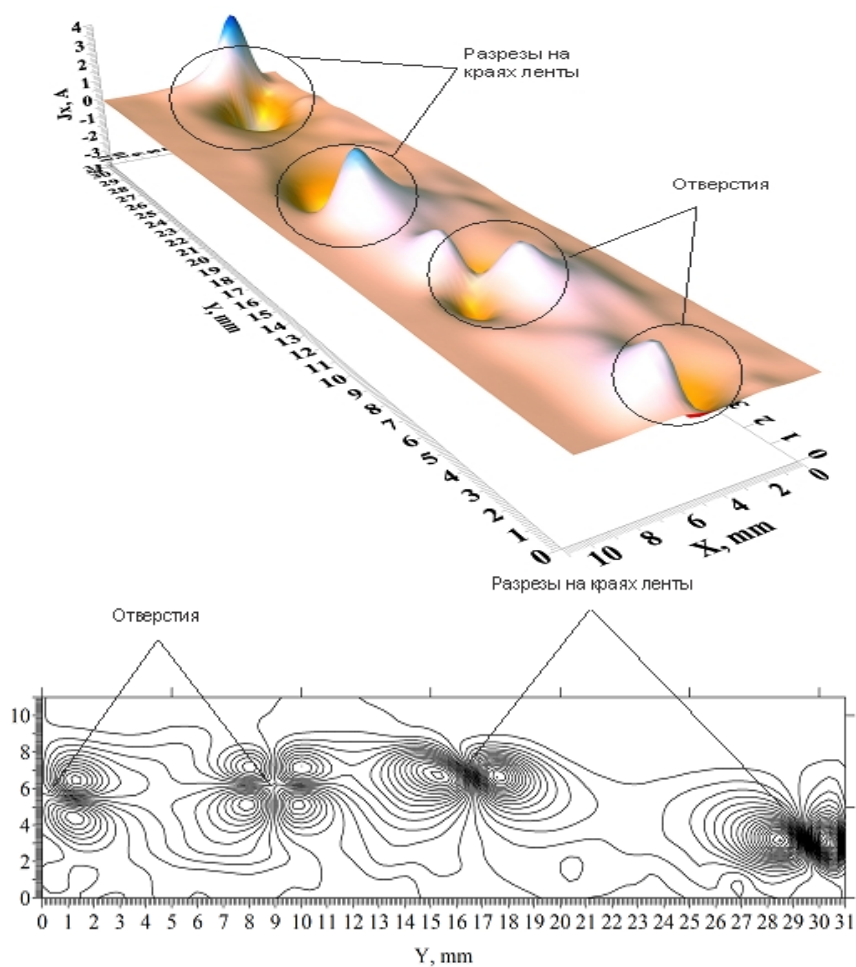


Рисунок 3 – Сверху – поверхность распределения поперечной компоненты транспортного тока, снизу – линии уровня поперечной компоненты транспортного тока

Третья глава посвящена экспериментальным результатам апробации бесконтактной методики исследования локальных токонесящих характеристик ВТСП композитов. Были проведены исследования локальных токонесящих характеристик промышленных композитных ВТСП лент и ВТСП пленок  $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  на подложке  $SrTiO_3$ . Сравнение проводилось, прежде всего, с результатами транспортных измерений. Был использован мультитерминальный метод измерений критического тока. Показано возникновение локального распределения потенциала в ВТСП композите при протекании транспортного тока. Сравнение транспортных измерений с результатами холловской магнитометрии и восстановления токового распределения показало качественное и количественное совпадение полученных результатов (рисунок 4). Расхождение результатов – 7.2%. Была исследована связь между локальными дефектами структуры и токовыми неоднородностями в ВТСП пленках на кристаллической и металлической подложке. Показана возможность детектирования дефекта с размерами меньше шага сканирования магнитного поля. Связь реального размера дефекта и токового домена определяется показателем степени ВАХ сверхпроводника.

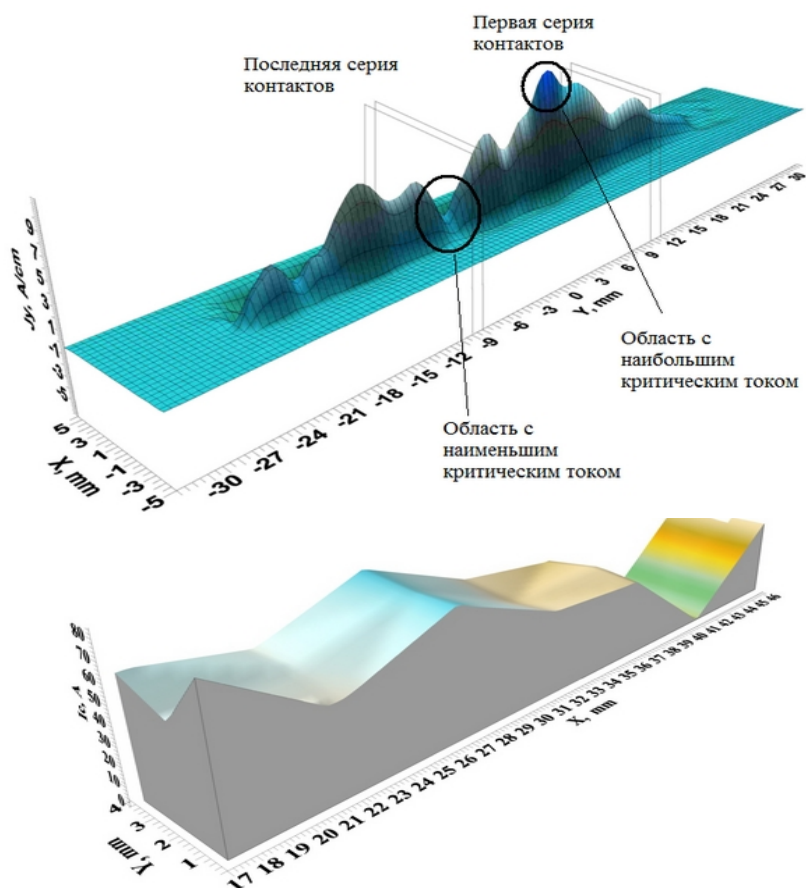


Рисунок 4 — Сверху - поверхность распределения компоненты критического тока вдоль ВТСП ленты, снизу - поверхность распределения критических токов в образце ВТСП ленты при мультитерминальных измерениях. Область с наименьшим критическим током ( $x=41.5$  мм),  $I_c = 4$  А

Проведено исследование промышленной композитной ВТСП ленты с токовыми дефектами (краевые трещины и область локального пониженного критического тока). Показано возникновение характерной топологии перераспределения тока в сверхпроводнике, соответствующей типу макроскопического дефекта (рисунок 5). Полученные результаты соответствуют найденным особенностям распределения тока в модельных образцах.

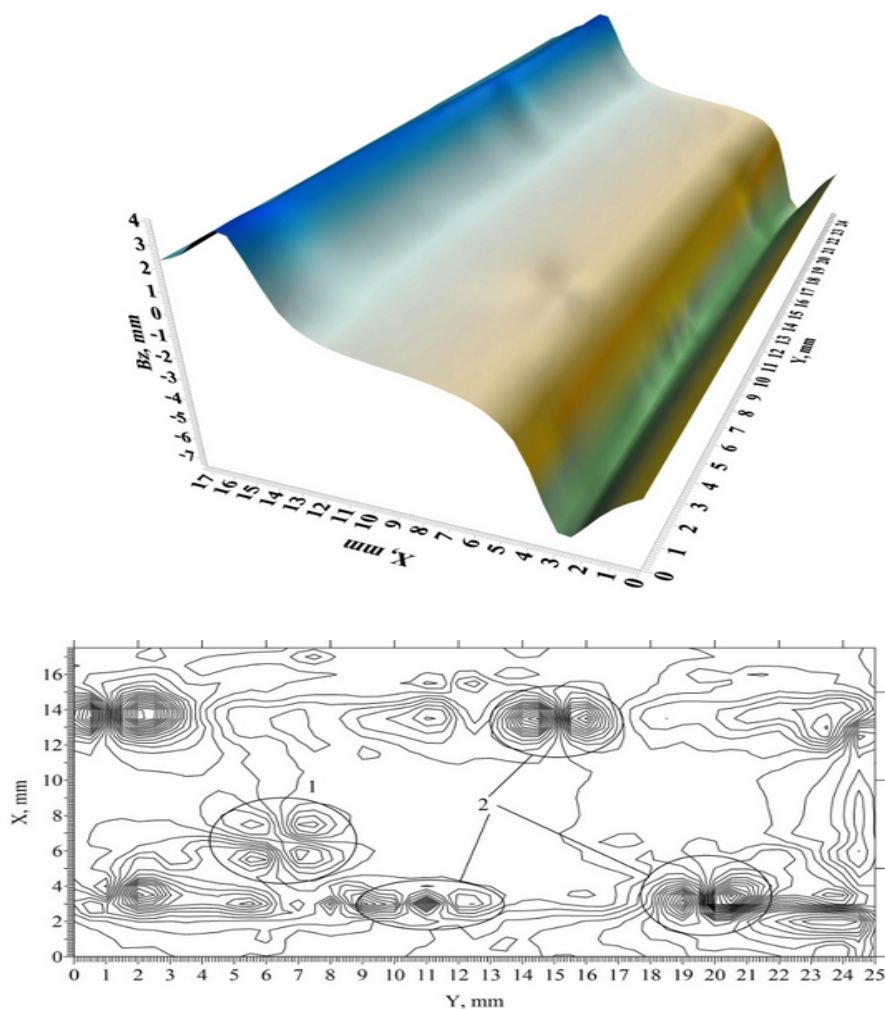


Рисунок 5 – Сверху – поверхность распределения магнитного поля транспортного тока ВТСП ленты ( $I=110$  А), снизу – линии уровней компоненты тока поперек ВТСП ленты.

1 – дефектная область ВТСП ленты, 2 – трещины на краях ленты

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты исследования изменения локальных свойств современных композитных ВТСП лент под действием изгибных нагрузок. Анализ деградации и возникновения токовых неоднородностей в ВТСП композитах показал различное поведение образцов в зависимости от способа изгиба. Намотка лент проводилась на формере диаметром от 70 мм до 10 мм в двух вариантах: сверхпроводник внутрь и сверхпроводник наружу. При этом возникает деформация ВТСП пленки сжатия и растяжения соответственно. Были проведены транспортные измерения и исследования локального распределения тока методом холловской магнитометрии (рисунок 6, 7, 8).

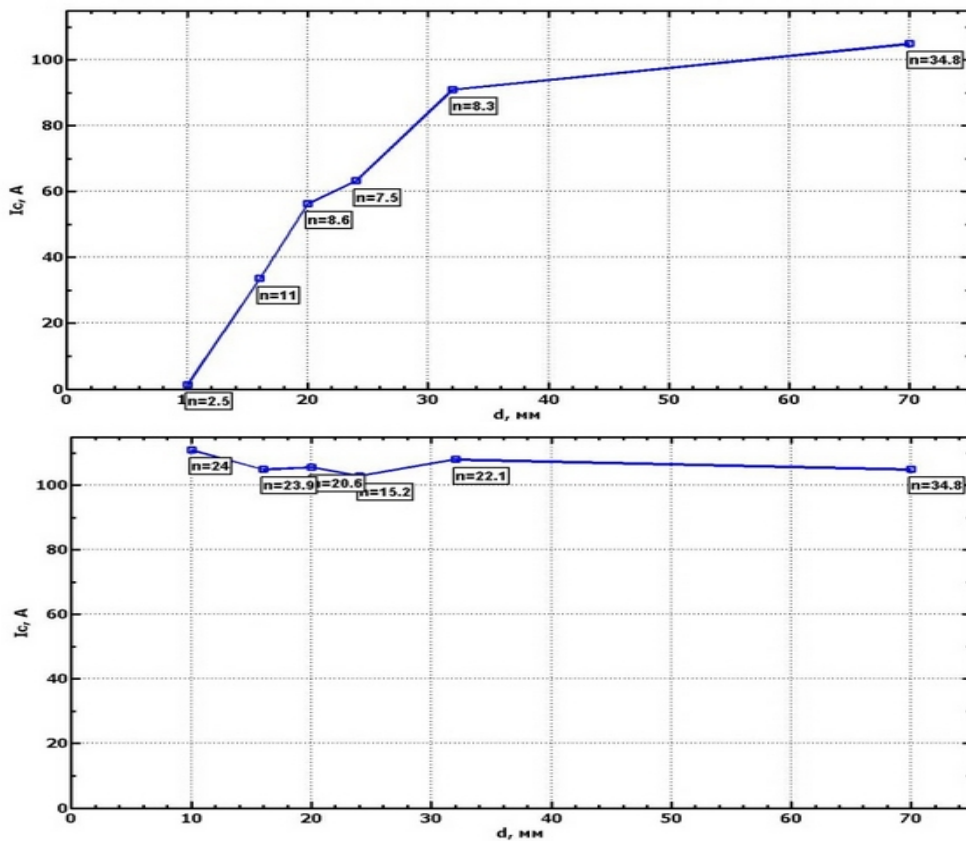


Рисунок 6 — Пример зависимости транспортного критического тока от диаметра изгиба. Сверху - образец AmericanSuperconductor при растяжении, снизу — образец SuperPower при сжатии

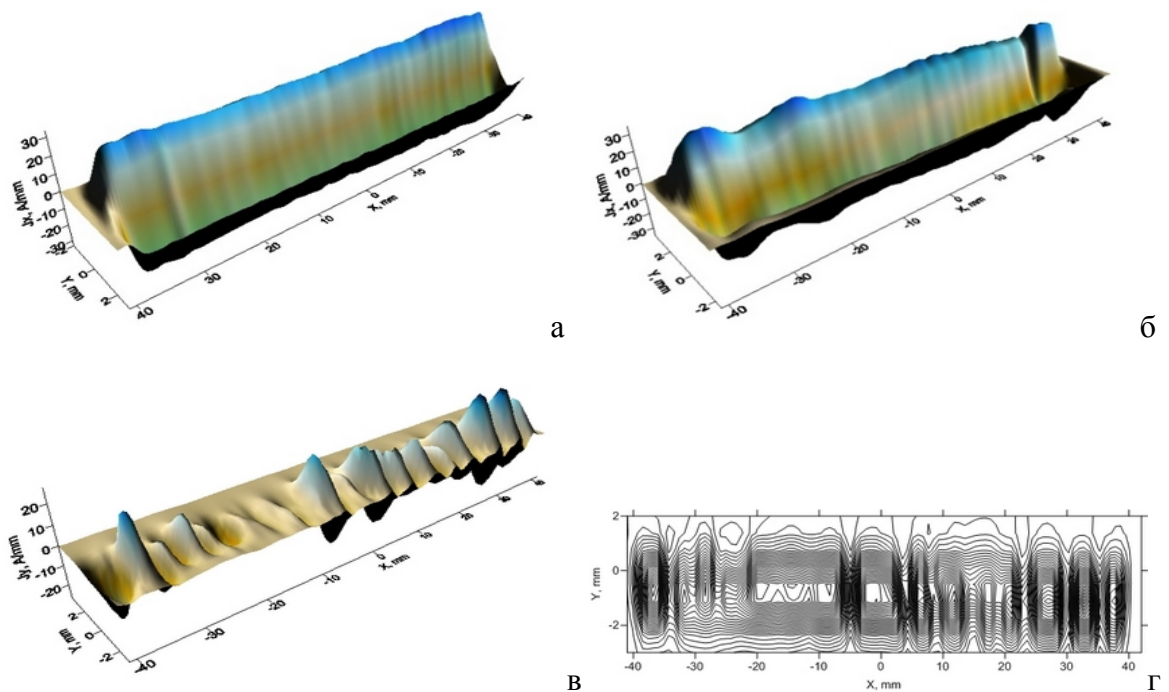


Рисунок 7 – Поверхность распределения продольной компоненты тока  $J_x(x, y)$  образца AmericanSuperconductor при деформации растяжения. Диаметр формера: а - 50 мм, б – 20 мм, в – поверхность распределения поперечной компоненты тока  $J_y(x, y)$ , диаметр формера 10 мм, г- линии тока, диаметр формера 10 мм

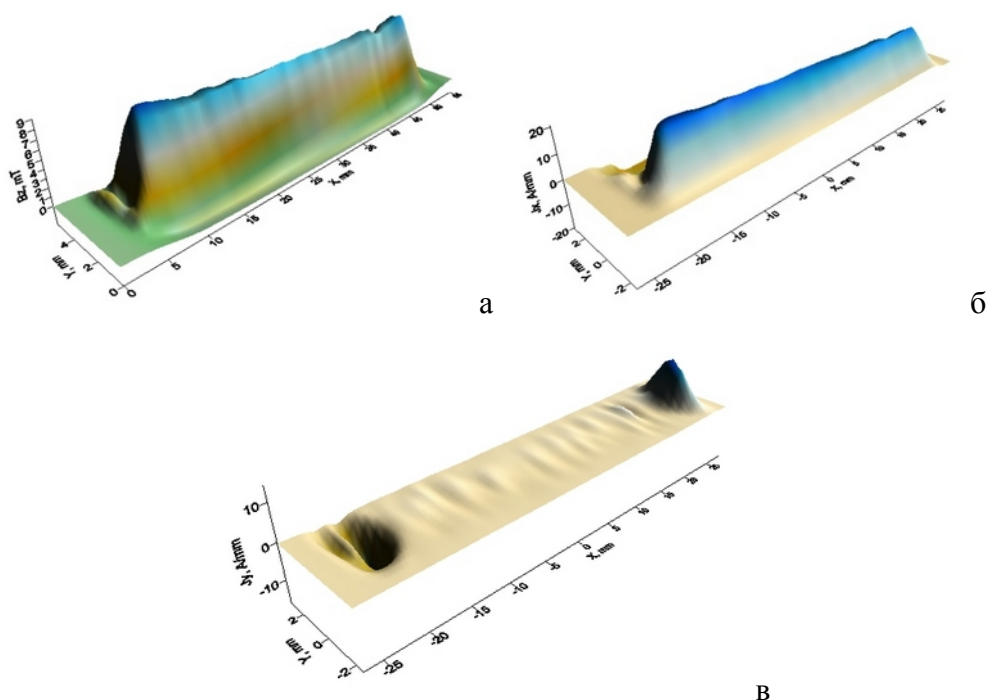


Рисунок 8 – Поверхности распределения: а- захваченного магнитного потока  $B_z(x,y)$ , б- продольной компоненты тока  $J_x(x,y)$ , в- поперечной компоненты тока  $J_y(x,y)$  SP5 при деформации сжатия. Диаметр формера 10 мм

В случае деформации растяжения в сверхпроводнике возникают множественные локальные области токовых неоднородностей при уменьшении диаметра оправки до 10 мм, в случае деформации сжатия локальных областей подавления тока не наблюдается. Также нужно отметить различия в поведении ВТСП композитов двух производителей. Так для лент компании SuperPower наблюдается сохранение высоких токнесущих характеристик (как локальных, так и интегральных) вплоть до диаметра формера 10 мм, после чего локальное распределение тока становится резконеоднородным, возникают множественные домены и области подавления токнесущих характеристик (рисунок 9). Максимальное значение критического тока при этом практически остается неизменным, в то же время минимальный ток падает более чем на 70%, и соответственно возникает большой ток поперек ВТСП ленты, явно указывающий на значительные области перетекания тока. На распределениях также отчетливо проявляются поперечные трещины, часть которых проходит от одного края ленты к другому по всей ширине и разделяет образец на несколько доменов (рисунок 7, 8).

В случае ВТСП ленты компании American Superconductor изменение локальных токнесущих характеристик происходит постепенно при уменьшении диаметра формера от 50 до 10 мм (рисунок 9), при этом на диаметре 20 мм в ленте возникает область, локальный ток в которой меньше среднего значения для остальной ленты на 23%, что приводит к резкому падению величины интегрального критического тока. Однако при этом оставшаяся

часть ленты способна переносить гораздо больший ток. При уменьшении диаметра так же, как и в ленте компании SuperPower, происходит интенсивное образование поперечных трещин и разделение образца на домены.

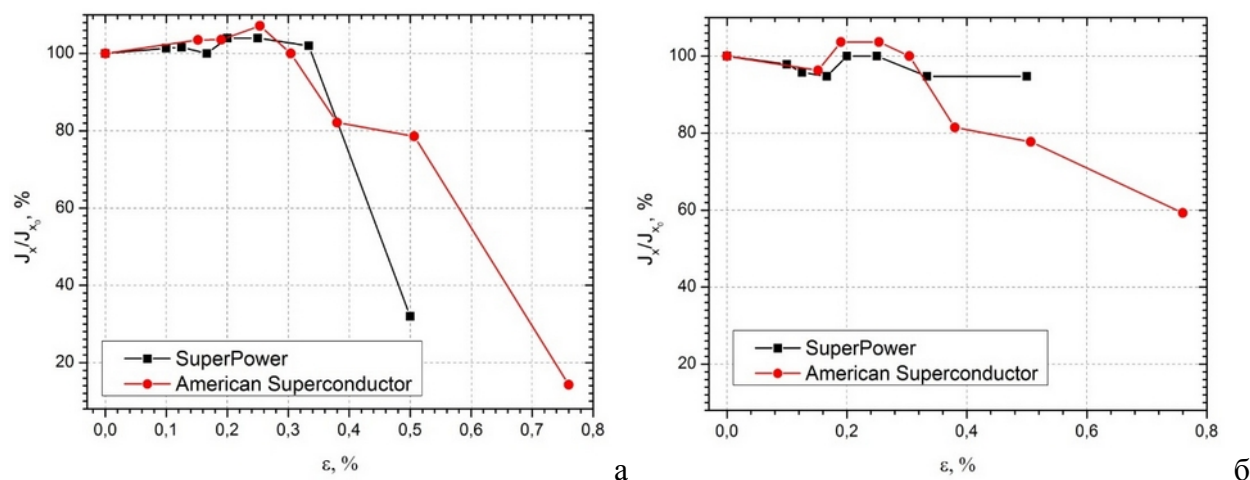


Рисунок 9 – График зависимости относительного изменения плотности критического тока от относительной деформации для образцов SuperPower и American Superconductor:

а – деформация растяжения, б – деформация сжатия

Существенное различие в поведении образцов связано с архитектурой ВТСП композита производителей, в частности, с положением нейтральной оси и свойствами материала подложки. В случае ВТСП композита положение центральной оси определяется толстыми слоями, а именно подложкой со слоями меди и припоя (если таковой имеется). Дegradaция ВТСП ленты компании American Superconductor начинается значительно раньше (уже при  $\epsilon > 0.25\%$ ), то время как для лент SuperPower аналогичные изменения возникают только при  $\epsilon > 0.35\%$ , и спад тока происходит более резко при росте деформации. Такое поведение можно объяснить прочностными свойствами подложек ВТСП композитов. Так в исследовании материалов подложек [4] было показано, что предел текучести ленты для материалов подложек при криогенных температурах значительно отличаются: для Ni-W значения находятся в интервале 250-280 МПа, для Hastelloy 650-800 МПа. Также переход к пластической деформации возникает при меньших деформациях подложки Ni-W (более 0.2%), аналогичный переход в подложке из сплава Hastelloy происходит при деформациях выше 0.35%. Также при деформациях выше 0.4% возникает необратимая деформация и растрескивание материалов буферных слоев, предельная деформация пленки YBCO также оценивается в пределах 0.36-0.4% [5,6], после чего возникает разрушение и образование трещин. При деформациях сжатия не происходит значительного падения тока вплоть до деформаций свыше 0.4%. Кроме того, в образцах наблюдается незначительный рост критического тока, возникающий при начальных деформациях порядка 0.3%. Такое



поведение может быть связано с улучшением связей кристаллитов в ВТСП пленке при деформации сжатия.

В пятой главе приведены результаты изучения влияния ультракоротких лазерных импульсов на локальные магнитные и транспортные характеристики современных композитных ВТСП композитов. Дано описание методики локального воздействия на композитные ВТСП ленты с помощью ультракоротких лазерных импульсов. Время импульса 200 фс и 2 пс, длина волны 870 нм. Приведены результаты комплексного исследования модификации образцов ВТСП композитов путем создания решетки искусственных центров пиннинга микронного диапазона (рисунок 10). Размер локальных дефектов варьировался от 3 до 16 мкм, расстояние между дефектами – 50 мкм.

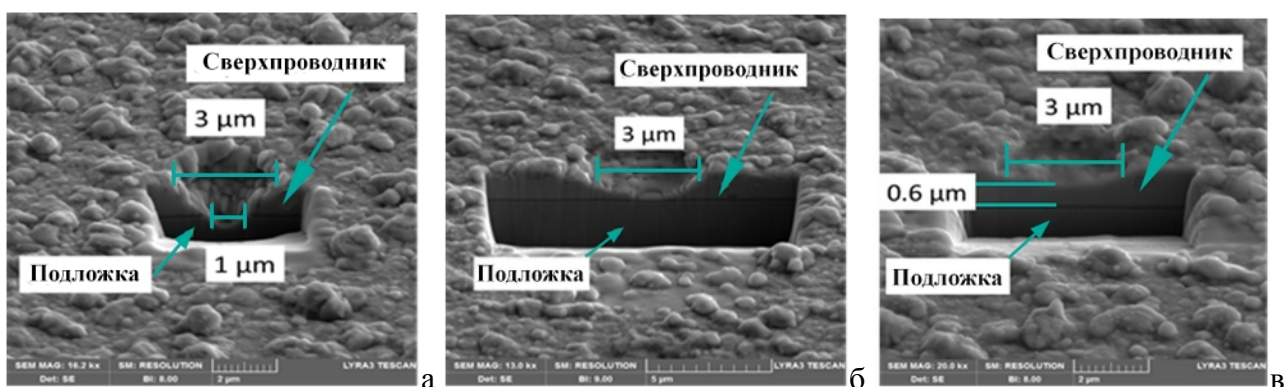


Рисунок 10 — Фотография сканирующего электронного микроскопа облученной области:

- (а) – Энергия импульса  $E=150$  нДж, 5 импульсов/точку, несквозное отверстие;
- (б) – Энергия импульса  $E=150$  нДж, 10 импульсов/точку, сквозное отверстие,
- (в) – Энергия импульса  $E=150$  нДж, 20 импульсов/точку, сквозное отверстие

Показано положительное влияние дефектов на магнитные и транспортные характеристик ВТСП композитов, локальное увеличение критического тока составило 49% (рисунок 11). Дано объяснение полученных результатов на основе модели вихревого состояния, модели Дью Хьюза и модели вихревого пути.

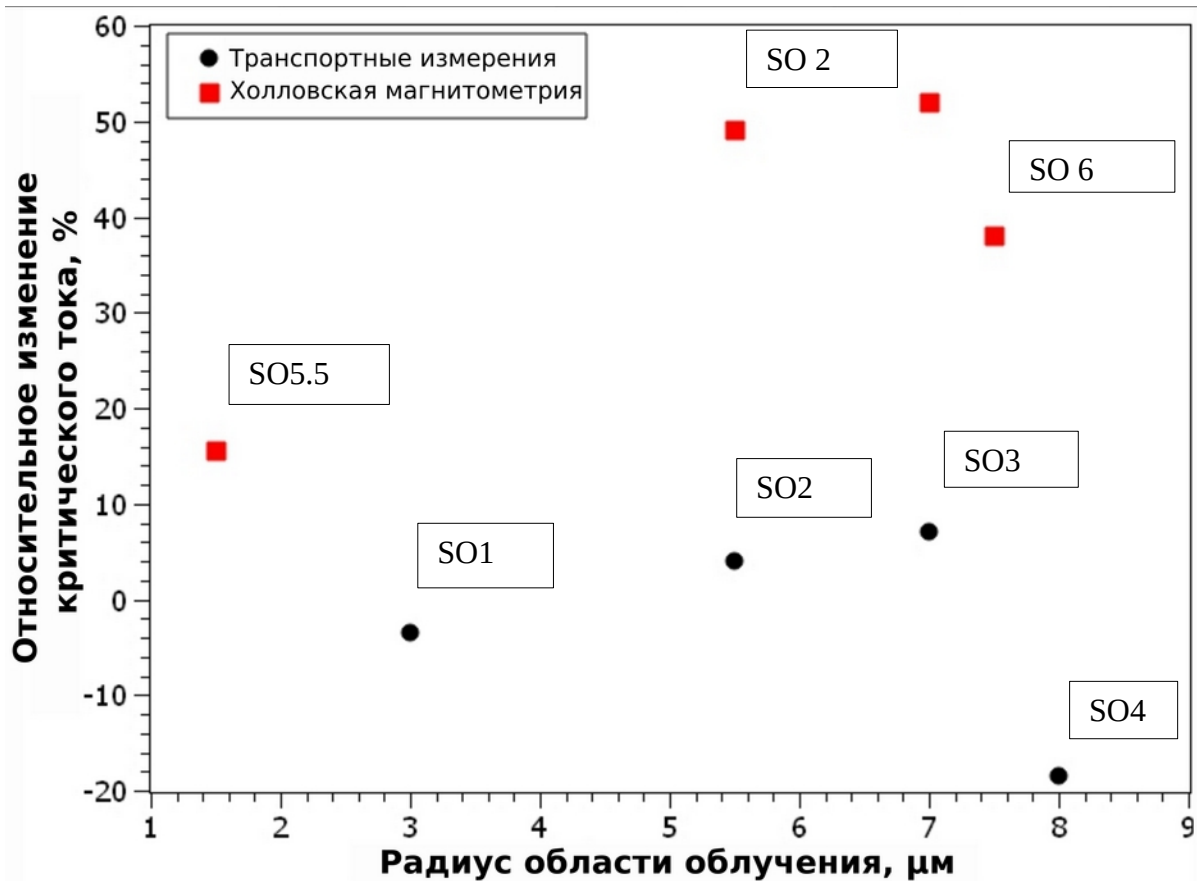


Рисунок 11 – Зависимость нормированного критического тока от радиуса области облучения, полученного с помощью транспортных измерений (критерий  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ) и метода холловской магнитометрии

Для того, чтобы выявить физическую природу влияния дефектов микронного размера на характеристики сверхпроводника, мы измерили петли намагниченности исходной и модифицированной композитной ленты. Магнитное поле перпендикулярно широкой части ВТСП ленты. Из полученных зависимостей по ширине петли намагниченности были получены значения критического тока от внешнего магнитного поля, а также угловые зависимости критического тока в магнитном поле. Анализ результатов проводился в рамках модели коллективного движения вихрей, при этом зависимости критического тока от магнитного поля описывались степенным законом  $J_c \propto H^{-\alpha}$ . Несмотря на то, что кривая для измененного образца проходит ниже чем для исходного, результаты аппроксимации степенной функцией показывают уменьшение степени  $\alpha$  от 0,65 (для исходного образца) до 0.52 (для модифицированного). Уменьшение составило 20%, что в свою очередь говорит об уменьшении скорости падения критического тока при модификации образца. Результат

хорошо согласуется с аналогичными исследованиями для ВТСП композитов с массивами больших дефектов [7,8].

В общем случае изменение пиннинга происходит в широком интервале магнитных полей. При малых значениях поля сравнительно небольшое количество индивидуальных вихрей закрепляются на естественных центрах пиннинга, подробно рассмотренных в работах [9–14], а также границах антидотов вблизи края ВТСП пленки. По мере увеличения магнитного поля проникающие с краев вихри испытывают отталкивание от вихрей, закрепленных вблизи границы сверхпроводника и по краям антидотов. Это приводит к формированию вблизи искусственных дефектов области разряжения, «вихревого вакуума», и с другой стороны увеличивает плотность вихрей между антидотами [15]. При дальнейшем увеличении магнитного поля новые вихри «проталкивают» предыдущие вглубь материала. Так вихри проникают через первую линию искусственных дефектов. Далее процесс повторяется для каждого ряда дефектов вплоть до достижения поля необратимости [16]. В нашем случае из-за большого периода массива дефектов влияние проявляется главным образом при больших амплитудах магнитного поля с большой плотностью вихрей. Положительное влияние также наблюдается на угловой зависимости критического тока в магнитном поле. Анализ в рамках модели свободного течения вихря указывает на изменение пиннинга с помощью искусственных дефектов микронного диапазона.

Таким образом, разработанные методики и полученные результаты позволяют выполнять не только поиск локальных токовых неоднородностей, но и локально управлять распределением критического тока. Дальнейшее развитие подходов позволит «залечивать» слабые области в промышленных образцах композитных ВТСП лент, что особенно актуально в случае длинномерных композитов.

Шестая глава посвящена адаптации методики исследования локальных токонесящих характеристик композитных ВТСП лент на случай длинномерных образцов. Дано описание методики исследования локального протекания тока в длинномерных композитах до 300 м (рисунок 12). На элемент измерительной системы получен патент на полезную модель магнитометрической линейки датчиков Холла. Приведены результаты исследования образца длинномерного ВТСП композита с неоднородностью от 5 до 50%. С использованием разработанной методики проведено исследование локального протекания тока в прямом образце, а также в случае сложной конфигурации — ВТСП ленты для кабеля типа Ребель.

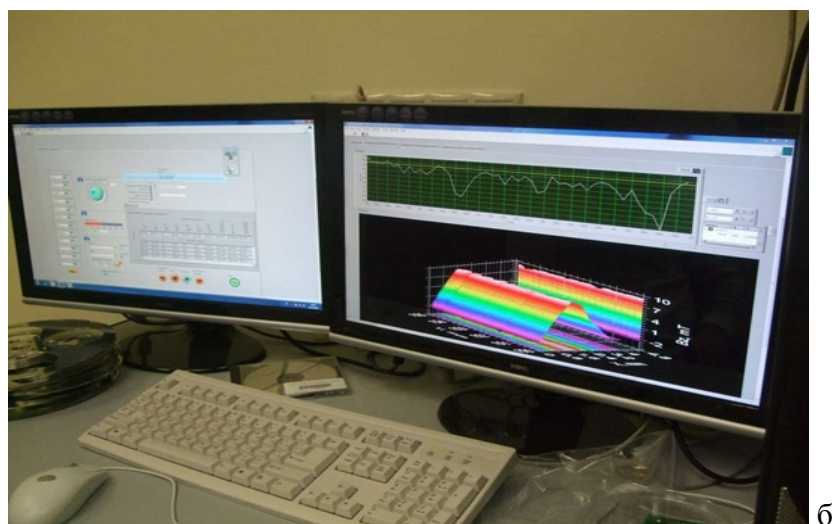
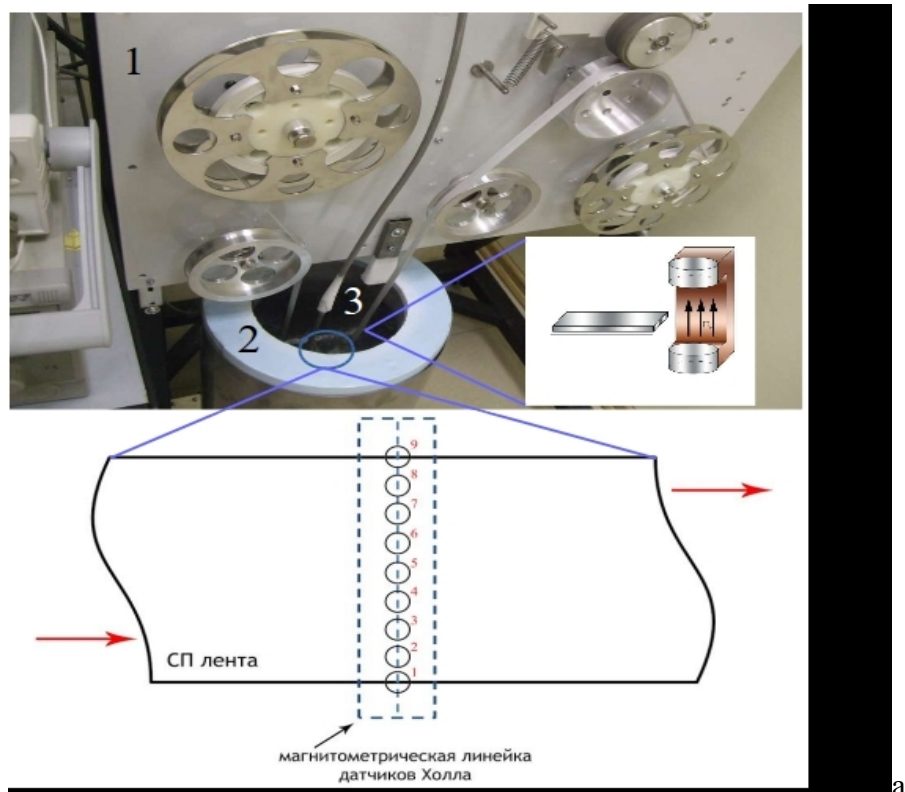


Рисунок 12 – Экспериментальный стенд. а– система измерения: 1 – система перемотки с СП лентой; 2 – система криостатирования; 3 – измерительная система и система намагничивания, б – система расчета и отображения результатов

Проведено исследование работоспособности разработанной методики к возникающим ошибкам, связанным с выходом из строя датчиков Холла. Точность восстановления данных будет сильно зависеть от того, где именно располагались поврежденные датчики. Полученные результаты остаются корректны с точки зрения особенностей протекания тока в сверхпроводнике с учетом их геометрии. Для рассмотренных случаев отклонение

определяемой величины локального тока от истинного не превысило 5 %, при этом возникает искажение пространственных размеров токовых неоднородностей, но сохраняется корректность в определении положения дефектов.

Стандартным результатом исследования локального распределения критического тока ВТСП ленты является его линейное распределение вдоль образца (рисунок 13). Так мы имеем набор значений  $I_{ci}(x_i)$ , где  $x_i = i \frac{N}{L}$  - это дискретный набор координат, в которых определен критический ток,  $L$  - длина ленты,  $N$  - количество точек распределения.

Средняя величина критического тока ленты, полученная из эксперимента  $\bar{I}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ci}$ ,

а напряжение  $V = \sum_{i=1}^N V_i$ . Для каждого участка ВТСП ленты критический ток определяется из

ВАХ по степенному закону  $V_i(I) = \frac{L}{N} E_c \left( \frac{I}{I_{ci}} \right)^n$ , предполагая, что показатель степени для всего образца один и тот же. Тогда общее электрическое поле, возникающее в сверхпроводнике будет определяться формулой (6) [17]:

$$E = \frac{V}{L} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N V_i = \frac{E_c}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{I}{I_{ci}} \right)^n \quad (6)$$

а критический ток всего образца будет равен (7)

$$\tilde{I}_c = \left( \frac{N}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{I_{ci}} \right)^n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

Для идеально однородной ленты значения критических токов, получаемых разными способами должны совпадать. На самом деле, поскольку образцы всегда обладают неоднородностью и показатель степени  $n$  в общем случае отличается на различных участках,

то величины не совпадают, относительное отклонение  $\varepsilon = \frac{\bar{I}_c - \tilde{I}_c}{\bar{I}_c}$

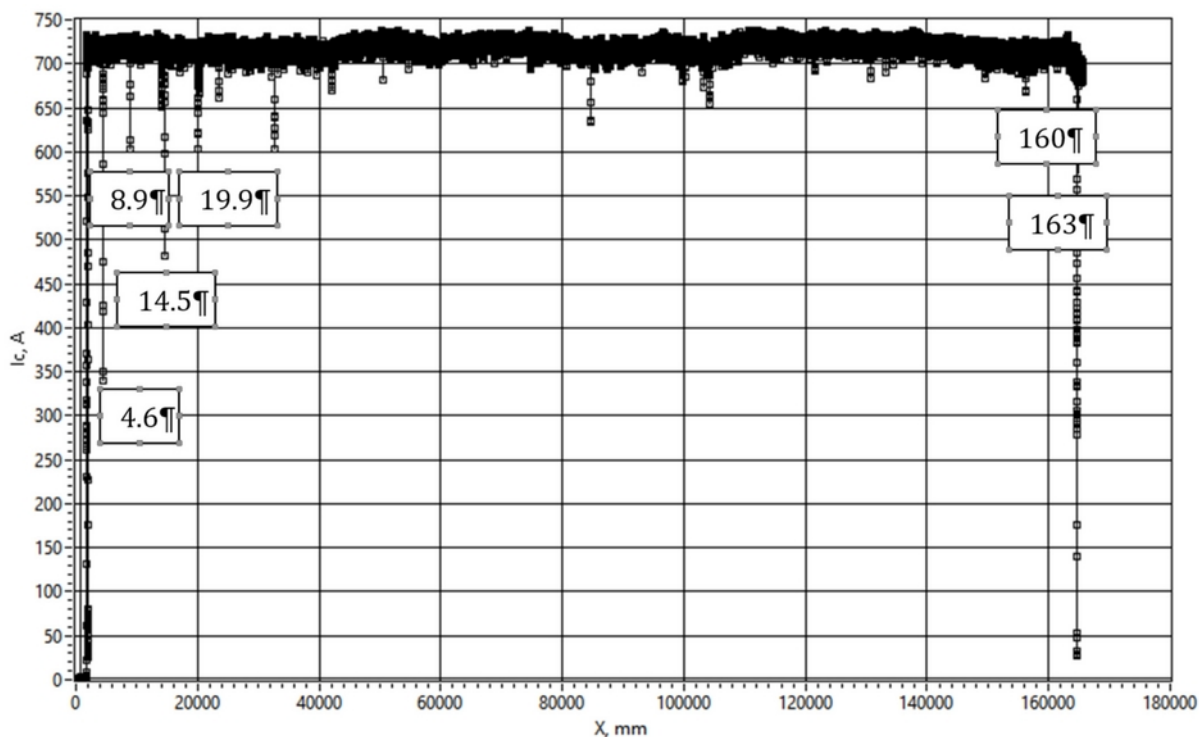


Рисунок 13 - Локальное распределение тока вдоль ВТСП композита. Длина 165 м

Выполнен анализ корреляции результатов бесконтактной методики с данными четырехконтактных измерений критического тока. Проведено исследование кусков длинномерной композитной ленты с однородностью критического тока от 4.5% до 26.5%. Показано качественное совпадение результатов, полученных обоими методами. При этом среднее значение локального критического тока не отражает реальные величины критического транспортного тока, соответствующего образцам, отличия составляют от 18 % до 80 %. Выполнено восстановление ВАХ длинномерной ленты и отдельных кусков с различной однородностью распределения тока. Форма вольтамперной характеристики восстанавливается корректно. Наилучшие результаты получены для участков с наибольшей однородностью, отличия в величине критического тока составляют 2-3% (рисунок 14). В общем случае бесконтактная методика дает минимальные значения интегрального показателя и позволяет получить оценки гарантированного уровня транспортного критического тока длинномерной ВТСП ленты.

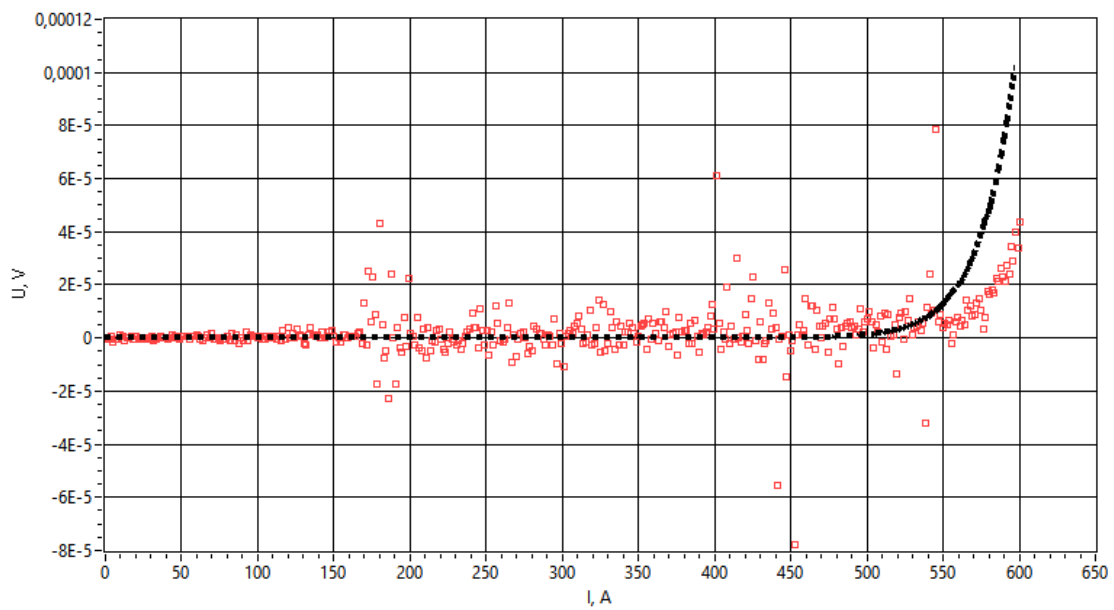
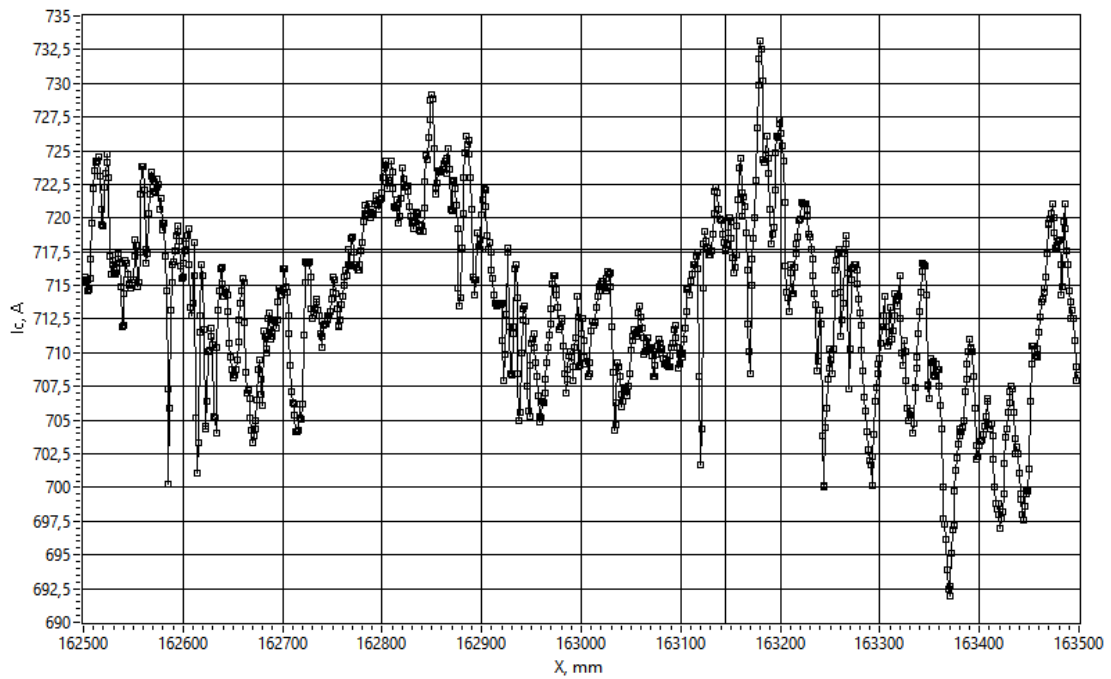


Рисунок 14 – Образец 163. Сверху – локальное распределение тока вдоль ВТСП ленты, снизу – вольтамперная характеристика (красный квадрат – эксперимент, черный круг – расчет)

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнена разработка и реализация научно обоснованной методики определения двумерного распределения тока в ВТСП композитах на основе решения задачи инверсии Био-Савара-Лапласа.

2. Выполнено восстановление распределения тока в модельных образцах при наличии токовых дефектов, а также промышленных образцах ВТСП композитов. Точность восстановления распределения тока не хуже 5%.

Выявлены топологические картины перетекания тока при наличии дефектов. Показано возникновение характерной топологии перераспределения тока в сверхпроводнике, соответствующей типу макроскопического дефекта. Полученные результаты соответствуют найденным особенностям распределения тока в модельных образцах.

3. Проведено исследование деградации и возникновения токовых неоднородностей в ВТСП композитах при изгибных нагрузках сверхпроводником внутрь и сверхпроводником наружу на ВТСП композитах различной архитектуры. Диаметр формера от 10 до 70 мм. Выявлены корреляции с прочностными свойствами материалов подложки буферных слоев композитного материала.

Найдены особенности возникновения локальных токовых доменов и деградации критического тока в ВТСП композитах в зависимости от архитектуры и режима намотки. Деградация композитов на подложке Ni-W начинается при деформациях  $\varepsilon > 0.25\%$  и происходит плавно с увеличением деформации, в то время как для композитов на подложке Hastelloy аналогичные изменения возникают только при  $\varepsilon > 0.35\%$  и спад тока происходит более резко при росте деформации.

4. Предложена и опробована методика локального воздействия на ВТСП композиты с помощью ультракоротких лазерных импульсов для создания искусственных центров пиннинга микронного диапазона. Показана возможность локального увеличения критического тока на 49%.

Анализ результатов на основе модели вихревого состояния, моделей Дью Хьюза и вихревого пути указывает на коллективный характер пиннинга при наличии упорядоченных систем искусственных центров пиннинга микронного диапазона.

5. Выполнена адаптации методики исследования локальных токонесущих характеристик композитных ВТСП лент на случай длинномерных образцов ВТСП композитов. Получен патент на полезную модель магнитометрической линейки датчиков Холла (измерительную часть экспериментального стенда).



Выполнен анализ корреляции результатов бесконтактной методики с данными четырехконтактных измерений критического тока для образцов с неоднородностью критического тока от 4.5% до 26.5%. Показано, что среднее значение локального критического тока не отражает реальные величины критического транспортного тока, соответствующего образцам, отличия составляют от 18 % до 80 % в зависимости от качества образца.

Разработанные методики и полученные результаты позволяют выполнять не только поиск локальных токовых неоднородностей, но и локально управлять распределением критического тока. Дальнейшее развитие подходов позволит «залечивать» слабые области в промышленных образцах ВТСП композитов, что особенно актуально в случае длинномерных образцов.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- A1. Podlivaev A.I., Pokrovskii S.V., Veselova S.V., Anishchenko I.V., and Rudnev I.A. The Magnetization of HTSC Tapes Stack in the Flux Pump Regime // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. Vol. 31, № 5. P. 1–5. ( Q2 )
- A2. Анищенко И.В., Покровский С.В., Осипов М.А., Абин Д.А., Грицаенко Д.И., Руднев И.А. Неравновесные состояния в ВТСП-композитах второго поколения при сверхкритических импульсных токовых воздействиях // Письма в журнал технической физики. 2021. Vol. 47, № 19. P. 22. (из Перечня ВАК)
- A3. Pokrovskii S.V., Bura A. A., Anischenko I. V., and Rudnev I. A. Nonequilibrium States in HTS Tapes under the Action of Short Current Pulses // Phys. Atom. Nuclei. 2019. Vol. 82, № 11. P. 1503–1507.
- A4. Anischenko I., Pokrovskii S., Osipov M., Rudnev I. Modeling of magnetization and levitation force of HTS tapes in magnetic fields of complex configurations // Supercond. Sci. Technol. 2019. Vol. 32, № 10. P. 105001. ( Q1 )
- A5. Pokrovskii S.V., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Mineev N.A., Timofeev A.A. and Rudnev I.A. Influence of ultrashort laser drilling on magnetic and transport characteristics of HTS tapes // Superconductor Science and Technology. 2019. Vol. 32, № 7. P. 075008. ( Q1 )
- A6. Podlivaev A.I., Pokrovskii S.V., Anishchenko I. V., and Rudnev I. A. Magnetometry Diagnostics of Defects in High-Temperature Superconducting Tapes in a Gradient Magnetic Field // Tech. Phys. 2019. Vol. 64, № 4. P. 480–489.
- A7. Подливаев А.И. Покровский С.В., Анищенко И.В., Руднев И.А. Прецизионная Магнитометрическая Диагностика Неоднородностей Критического Тока В

Высокотемпературных Сверхпроводящих Лентах // Журнал Технической Физики. 2017. Vol. 43, № 24. P. 96. (из Перечня ВАК)

- A8. Rudnev I., Mareeva A., Mineev N., Pokrovskiy S., Sotnikova A. Contactless measurements of local transport characteristics of coated conductors under the bending strain // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 507, P. 022029.
- A9. Pokrovskiy S.V., Rudnev I.A., Podlivaev A.I., Kalitka V.S., Blednov A.V., Adamenkov A.A. Experimental visualization of two-dimensional distribution of critical current in the long-length high temperature superconducting tapes // Scientific Visualization. 2014. Vol. 6, № 5. P. 1–7.
- A10. Rudnev I.A., Pokrovskiy S.V., Podlivaev A.I. An Application of Magnetic Measurements for Study of Local Transport Characteristics of Modern Superconducting Materials // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2012. Vol. 22, № 3. P. 9001304. ( Q2 )
- A11. Патент. Линейка датчиков холла для прецизионной магнитометрии / Руднев Игорь Анатольевич, Подливаев Алексей Игоревич, Покровский Сергей Владимирович, Сотникова Алла Павловна; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ" (НИЯУ МИФИ) (RU). — RU121940U1, заявка 2012130681/28, 2012.07.17; опубликовано 2012.11.10 (Рос. Федерация).

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bednorz J.G. Possible High Tc Superconductivity in the Ba - La- Cu- O System // Z. Phys.B - Condensed Matter. 1986. Vol. 64. P. 189–193.
2. Wu M.K. et al. Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure // Physical Review Letters. 1987. Vol. 58, № 9. P. 908–910.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва: Наука, 1986.
4. Clickner C.C. et al. Mechanical properties of pure Ni and Ni-alloy substrate materials for Y–Ba–Cu–O coated superconductors // Cryogenics. 2006. Vol. 46, № 6. P. 432–438.
5. Sugano M. et al. The direct evaluation of the internal strain of biaxially textured YBCO film in a coated conductor using synchrotron radiation // Superconductor Science and Technology. 2009. Vol. 22, № 1. P. 015002.
6. Cheon J.H., Shankar P.S., Singh J.P. Influence of processing methods on residual stress evolution in coated conductors // Superconductor Science and Technology. 2005. Vol. 18, № 1. P. 142–146.
7. Palau A. et al. Guided vortex motion in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin films with collective ratchet pinning potentials // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. 2012. Vol. 85, № 1. P. 1–5.

8. Palau A. et al. Pinning regimes of grain boundary vortices in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  coated conductors // *Physical Review B*. 2006. Vol. 73, № 13. P. 132508.
9. Pan A.V., Dou S.X. Comparison of small-field behavior in Mg B<sub>2</sub>, Low- and high-temperature superconductors // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 2006. Vol. 73, № 5. P. 1–4.
10. Pan A.V. et al. Thermally activated depinning of individual vortices in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  superconducting films // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2004. Vol. 407, № 1–2. P. 10–16.
11. Wells F.S. et al. Analysis of low-field isotropic vortex glass containing vortex groups in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  thin films visualized by scanning SQUID microscopy // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. P. 8677.
12. Wells F.S. et al. Dynamic magneto-optical imaging of superconducting thin films // *Superconductor Science and Technology*. 2016. Vol. 29, № 3. P. 35014.
13. Olson Reichhardt C.J., Reichhardt C. Vortex dynamics and symmetry locking on quasiperiodic and periodic substrates // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2012. Vol. 479. P. 45–48.
14. Crisan A. et al. Vortex imaging and local magnetization studies in HTS by scanning Hall probe microscopy // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2004. Vol. 408–410, № 1–4. P. 555–557.
15. Jooss Ch. et al. Magneto-optical studies of current distributions in high-  $T_c$  superconductors // *Rep. Prog. Phys.* 2002. Vol. 65. P. 651–788.
16. Reichhardt C., Reichhardt C.J.O. Transverse ac-driven and geometric ratchet effects for vortices in conformal crystal pinning arrays // *Physical Review B*. 2016. Vol. 93, № 6. P. 1–14.
17. Wang Y. et al. Detecting and describing the inhomogeneity of critical current in practical long HTS tapes using contact-free method // *Cryogenics*. 2007. Vol. 47, № 4. P. 225–231.