**ОАО «Всероссийский Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Кабельной Промышленности»**

*На правах рукописи*

**СОТНИКОВ Дмитрий Викторович**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОНЕСУЩИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

**Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
д. т. н. Высоцкий Виталий Сергеевич

Научный консультант:
к. т. н. Потанина Людмила Владимировна

**Москва 2016**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

**ВВЕДЕНИЕ…….…… 4**

**ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР…….……..…… 12**

1.1. Основные понятия сверхпроводимости…..……... 12

1.2. Анализ современных производителей высокотемпературных сверхпроводников…….……... 14

1.3. Характеристики ВТСП…….… 17

1.3.1. Критический ток …… 17

1.3.2. Устойчивость к изгибам ……..... 19

1.3.3. Анизотропия критического тока ВТСП лент во внешнем магнитном поле ……..……... 23

1.4. Распределение плотности тока по сечению ВТСП лент и особенности поведения критического тока во внешнем поле……..…… 25

**ГЛАВА 2. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОНЕСУЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК…..... 39**

2.1. Определение критического тока сверхпроводников……..... 39

2.2. Исследование устойчивости ВТСП лент к изгибам ……..……... 45

2.3. Исследование анизотропии критического тока ВТСП лент под воздействием внешнего магнитного поля……. 50

**ГЛАВА 3. ТОКОНЕСУЩИЕ СВОЙСТВА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВТСП ЛЕНТ…….…… 53**

3.1. Основные современные производители ВТСП лент …… 53

3.2. SuperPower…….…… 53

3.3. AmericanSuperconductors…….……..... 63

3.4. Sumitomo Electric Industries, Ltd.…….…. 65

3.5. SuperOx…….. 69

3.6. SuNAM…….…. 72

3.7. Сравнительный анализ характеристик исследованных ВТСП лент…….. 74

3.8. Выводы к главе 3 …….. 79

**ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ…….…..… 81**

4.1. Описание особенности поведения……...…….. 81

4.2. Возможные причины явления……..…… 81
4.3. Методика проведения эксперимента……..…….. 85
4.4. Результаты…….…… 87
4.5. Обсуждение……...…… 93
4.6. Выводы ……..... 95
**ГЛАВА 5. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ВТСП ЛЕНТАХ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ……..... 96**
5.1. Обоснование необходимости разработки методов для исследования распределения плотности тока в ВТСП лентах …..…… 96
5.2. Методы пересчета из поля в ток ...…….…….... 96
5.3. Методика измерения собственного поля ВТСП лент ..…….…….... 98
5.3.1. Непрерывный метод ……..… 98
5.3.2. Дискретный метод ……..…… 101
5.3.3.Гибридный метод измерения распределения плотности тока по ширине ВТСП лент 2-го поколения……..…….……... 103
5.4. Результаты измерений …… 105
5.5. Анализ результатов……..… 106
5.6. Выводы к главе 5 ……...……..... 107
**ГЛАВА 6. ТОКОНЕСУЩИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕННЫХ МЕТОДОМ ПАЙКИ ВТСП ЛЕНТ 1-ГО ПОКОЛЕНИЯ ...……...** 108
6.1. Соединение ВТСП лент…… 108
6.2. Методика измерения токонесущих свойств спаянных ВТСП лент……..... 108
6.3. Токонесущие свойства соединенных ВТСП лент ……..…… 109
6.4. Оценка возможности применения соединенных методом пайки ВТСП лент 1-го поколения для электротехнических устройств…… 113
6.5. Выводы к главе 6 ……..…… 114
**ЗАКЛЮЧЕНИЕ……...…… 115**
**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ……..…. 117**
**ПРИЛОЖЕНИЕ А……. 121**
**ПРИЛОЖЕНИЕ Б……. 124**

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Явление сверхпроводимости с момента открытия всегда привлекало исследователей и разработчиков электротехнических устройств из-за нулевого сопротивления материалов в сверхпроводящем состоянии.

Отсутствие резистивного сопротивления и большая плотность тока позволили по-новому оценить возможности магнитов, силовых кабелей, трансформаторов. Низкие потери, небольшие габариты, отсутствие нагрева, – всё это привело к созданию новых, более мощных и компактных электротехнических устройств. Большим недостатком оставалась дорогостоящая и сложная в производстве и эксплуатации криогенная техника, необходимая для сверхпроводящих устройств, поскольку явление сверхпроводимости обнаруживалось в материалах только при температурах близких к температуре жидкого гелия – 4.2 К.

Открытие в 1986 году высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) позволило по-новому взглянуть на возможности применения сверхпроводимости в реальных условиях. Проявление сверхпроводящих свойств у ВТСП материалов уже при температуре жидкого азота (77 °К) значительно удешевило и упростило криогенную технику. И на сегодняшний день уже созданы и внедрены силовые сверхпроводящие кабели во многих странах мира, в том числе и в России. Высокотемпературные сверхпроводники рассматриваются как основной материал во многих перспективных электроэнергетических и электротехнических устройствах, таких как ветрогенераторы, электромоторы, токоограничители, катушки для магнитно-резонансной томографии, силовые кабели.

До использования ВСТП ленты в устройстве необходимо знать её свойства, условия её применения. Основной характеристикой любого сверхпроводника, который позволяет оценить его возможности, является критический ток – ток, протекающий по сверхпроводнику, при котором материал начинает переходить из сверхпроводящего состояния в нормальное.

Критический ток показывает максимальный транспортный ток в сверхпроводнике в заданном магнитном поле. Многие лаборатории мира борются за повышение значения критического тока в их ВТСП лентах, применяя различные технологии производства, используя новые материалы и модифицируя ранее известные. Оценка критического тока – необходимая процедура перед проектированием любого сверхпроводящего электротехнического устройства, которая выполняется в обязательном порядке. Для этого измерения разработаны различные методики, но самым надежным и проверенным временем является четырех-контактный метод, в ходе которого напряжение измеряется непосредственно на ленте. Он применяется как для измерения одиночных лент, так и для измерения критического тока на уже выполненных электротехнических устройствах.

ВТСП лента является сложным композиционным материалом, и в зависимости от методов получения подразделяется на ленты 1-го и 2-го поколения. Разделение на два типа строится на основе методов получения: металлургический («порошок-в-трубе») и физико-химический (осаждение). Ленты 1-го поколения получаются более однородными, чем ленты 2-го поколения. Критический ток на этих лентах по длине отличается незначительно, и производители могут создавать сверхпроводник с малым разбросом критического тока по длине до 1000 м. В случае лент 2-го поколения производители заявляют разные результаты: от сотни до тысячи метров однородной по длине ленты. Однако многие электротехнические устройства требуют длины большие, чем 1000 м, и поэтому крайне остро стоит вопрос о том, каким образом делать соединения лент с наименьшими потерями и нагревом за счет соединения.

Критический ток ВТСП ленты в устройстве и критический ток исходной ВТСП ленты при предварительном измерении могут сильно различаться. В первую очередь это связано с деформацией при практическом применении, будь то кабель, соленоид или другая конструкция. Для оценки возможности использования лент был введен главный параметр гибкости

ленты – минимальный диаметр изгиба, а для кабеля еще и минимальный шаг намотки. Эти параметры показывают гибкость ленты, и чем ниже величина минимального диаметра изгиба, тем большим деформациям может быть подвергнута лента без ущерба токонесущей способности.

Помимо состава ВТСП ленты критический ток зависит также и от внешних факторов: от внешнего магнитного поля, механического воздействия и деформации, температуры. Когда же речь идет об электротехническом устройстве на основе сверхпроводников с большой плотностью тока, то возникающее в таком устройстве поле воздействует и на сами сверхпроводники не менее, чем на окружающую среду. Так, если в кабелях возникает поле до 0,05 Тл параллельное поверхности ленты, то в моторах величина магнитного поля достигает 3 Тл. Поэтому в зависимости от проектируемого электротехнического устройства необходимо провести анализ влияния внешнего магнитного поля на критический ток ленты, исследовать анизотропию критического тока.

Как показали измерения, анизотропия критического тока в поле для ВТСП лент 2-го поколения может быть несимметричной. В зависимости от взаимного направления тока и поля для ВТСП лент 2-го поколения критический ток является различным. Это свойство проявляется во всех ВТСП лентах 2-го поколения у всех производителей. Причем, разница критического тока превышает 10% от критического тока исходной ВТСП ленты. Правильное использование обнаруженного эффекта даст преимущество в применении ВТСП лент.

Данная работа посвящена исследованию токонесущих свойств высокотемпературных сверхпроводящих лент для электротехнических устройств. В ходе выполнения работы были исследованы более 100 различных ВТСП лент 5-ти производителей со всего мира. Разработаны и внедрены специальные программы по управлению приборами и обработки данных. Усовершенствованы и введены в эксплуатацию новые методы исследования основных свойств. Обнаружено и всесторонне исследовано

свойство несимметричности анизотропии ВТСП лент 2-го поколения. Была разработана новая гибридная методика измерения распределения плотности тока по ширине ВТСП ленты для наглядного наблюдения за перетеканием токов.

**Цели и задачи исследования**

Цель работы состояла в исследовании токонесущих свойств перспективных ВТСП лент для их дальнейшего прикладного применения в электротехнических устройствах.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

– автоматизация управления измерительными приборами;

– автоматический расчет токонесущих характеристик;

– проведение измерений критического тока перспективных ВТСП лент для применения в реальных электротехнических устройствах;

– усовершенствование методики определения минимального диаметра изгиба ВТСП лент, имитирующей деформацию материала в реальном электротехническом устройстве;

– исследование поведения критического тока ВТСП лент во внешнем магнитном поле;

– исследование влияния спая на токонесущие свойства ВТСП лент;

– подробное исследование обнаруженной несимметричности анизотропии критического тока ВТСП ленты во внешнем магнитном поле;

– исследование перетекания токов по ширине ВТСП ленты 2-го поколения во внешнем магнитном поле при разных углах между поверхностью ленты и направлением поля.

**Методы и объекты исследования**

Для решения поставленных в работе задач применялся четырех-контактный метод измерения вольтамперной характеристики, программы автоматизации и обработки данных были реализованы в среде LabVIEW и MATLAB, разрезание ленты проводилось на YGO-лазере, исследование распределения плотности тока по ширине ленты проводилось по комбинированному методу на основе известных ранее непрерывном и дискретном методов. Измерения проводились на ВТСП лентах пяти лидирующих в мировом производстве данного материала компаний: SuperPower, American Superconductors, Sumitomo, SuperOx и SuNAM.

**Научная новизна**

– Разработана и внедрена в измерительный процесс программа в среде LabVIEWдля автоматического управления приборами при измерении вольтамперной характеристики ВТСП ленты с дальнейшей обработкой полученных данных и расчетом всех характеристик.

– Усовершенствованы методики измерения критического тока, повышена точность измерений, разработаны новые методики измерения критического тока изогнутых образцов.

– Рассмотрены токонесущие свойства спаянных ВТСП лент, используемых в электротехнических устройствах в отсутствие длинномерных ВТСП лент.

– Обнаружена и исследована несимметричность анизотропии критического тока ВТСП лент 2-го поколения во внешнем магнитном поле.

– Разработана методика измерения перераспределения плотности тока по ширине ВТСП ленты 2-го поколения, представляющая собой гибридный метод на основе методов сканирующего датчика Холла и массива датчиков Холла.

**Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов исследования, корректной постановкой математических задач, использованием обоснованных методов математических расчетов, а также соответствием полученных результатов данным научной литературы, совпадением расчетных и экспериментальных данных.

**Практическая ценность**

Разработано программное обеспечение, ускоряющее процесс измерений и обработки данных и позволяющее получать более точные данные сразу после измерений. При помощи этой программы проведены измерения критического тока наиболее перспективных ВТСП лент. Кроме того, программа также позволяет рассчитывать такие характеристики, как параметр нарастания и резистивное сопротивление в случае его наличия. В итоге были получены начальные данные для более 10 типов ВТСП лент, которые необходимы при дальнейшем проектировании электротехнических устройств.

Исследовано изменение токонесущих свойств соединенных путем пайки ВТСП лент 1-го поколения в отличие от неспаянных, что имеет важное прикладное значение, так как пайка ВТСП лент широко применяется для создания электротехнических устройств в отсутствие однородных ВТСП лент по длине более 500 м.

При исследовании поведения критического тока во внешнем магнитном поле было обнаружено новое явление, ранее не встречавшееся в научной литературе. Как показали эксперименты, анизотропия критического тока является несимметричной, и в зависимости от прямого или противоположного направления внешнего поля разница в значениях критического тока превышает 10% процентов от критического тока исходной

ВТСП ленты. Учет этого явления позволит создавать более эффективные электротехнические устройства при правильном расположении ВТСП лент.

**Автор защищает**

1. Методики измерения токонесущих характеристик ВТСП лент.
2. Результаты измерений токонесущих свойств ВТСП лент, а также составленную на основе этих измерений рекомендательную таблицу по применению ВТСП лент в электротехнических устройствах.
3. Результаты исследования впервые обнаруженного эффекта зависимости критического тока ВТСП лент 2-го поколения от направления силы Лоренца.
4. Гибридную методику исследования распределения плотности тока по ширине ВТСП лент, основанную на ранее известных непрерывном и дискретном методах.
5. Результаты исследования воздействия соединения методом пайки на токонесущие способности ВТСП лент 1-го поколения.
6. Разработанную и внедренную программу автоматизации управления измерениями и расчета критического тока ВТСП лент в среде программирования LabVIEW.

**Апробация работы.**

Материалы, которые легли в основу данной диссертации, опубликованы в научных статьях, и докладывались на Superconductivity Centennial Conference 2011 - EUCAS–ISEC–ICMC (Нидерланды, Гаага, 2011), на Национальных конференциях по прикладной сверхпроводимости НКПС-2011 (Россия, Москва, 2011) и НКПС-2013 (Россия, Москва, 2013), на конференции по напыленным проводникам для устройств CCA-2012 (Германия, Хайдельберг, 2012), на конференции по сверхпроводимости и магнетизму ICMS2014(Турция, Анталия, 2014), на 25-й международной конференции по криогенной технике и международной конференции по

криогенным материалам ICEC/ICMC2014 (Нидерланды, Твенте, 2014), на международной конференции по электротехнике, электронике и электроприборам МКЭЭЭ-2014 (Крым, Алушта, 2014), европейской конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS (Франция, Лион, 2015).

**Публикации**

По теме диссертации опубликовано и представлено на научных конференциях 8 работ, в том числе в изданиях по перечню ВАК – 4 работы.

**Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Материалы изложены на 125 страницах, содержат 93 рисунка, 11 таблиц и 2 приложения. Список литературы состоит из 41 наименования.

# ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1. Основные понятия сверхпроводимости

Нулевое сопротивление и вытеснение магнитного потока являются основными свойствами любого сверхпроводника, при этом второе свойство является следствием первого [1]. Однако оказалось, что при некотором значении приложенного внешнего магнитного поля сверхпроводящее состояние разрушается. Это поле называется критическим $H_c$, оно является различным для разных сверхпроводников [1]. Очевидно, что воздействие на сверхпроводник может оказывать как внешнее поле, так и собственное, возникающее за счет протекания токов по самому сверхпроводнику. Плотность тока, при котором происходит переход из сверхпроводящего состояния в нормальное, называется критической. Критическая плотность тока $J_c$ является одной из важнейших характеристик сверхпроводников, наглядно показывающей потенциал того или иного материала при его практическом применении.

При всех описанных достоинствах сверхпроводники обладают своими свойствами только при крайне низких температурах (наиболее применяемая температура жидкого гелия 4,2 К), достижение которых является сложным и затратным процессом. Использование в качестве хладагента жидкого гелия увеличивает требования к безопасности, а также создает определенные трудности в обслуживании. Открытие в 1986 году так называемых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) придало новый импульс в области прикладной сверхпроводимости. ВТСП - это керамика на оксиде меди, критическая температура перехода которой из нормального в сверхпроводящее состояние гораздо выше, чем у всех известных ранее низкотемпературных сверхпроводников. Например, самая высокая критическая температура у открытого в 1993 году соединения $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ достигает 135 °К. У широко применяемой ВТСП керамики YBCO и BSCCO критическая температура составляет 93 °К и 110 °К соответственно [2]. Это свойство позволяет использовать сверхпроводящие

материалы при температуре жидкого азота – 77 К, который является значительно более дешевым и безопасным хладагентом, чем жидкий гелий.

В свою очередь, сами ВТСП делятся на два типа: ленты 1-го поколения (поликристаллическая структура) и ленты 2-го поколения (монокристаллическая структура) (рис. 1.1 [3]). Отличие этих видов ВТСП заключается в методике производства, и как следствие, в строении. Как будет показано далее, они отличаются и токонесущими характеристиками.

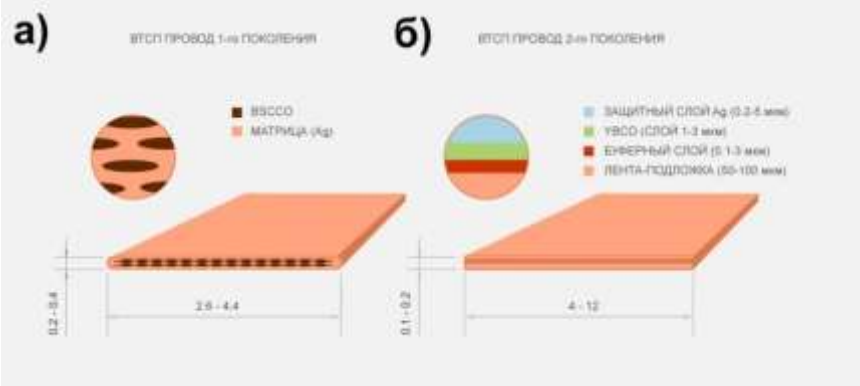



Рис. 1.1. Схематичное изображение ВТСП лент 1-го (а) и 2-го (б) поколения в сечении [3].

Ленты 1-го поколения выполнены по традиционным металлургическим технологиям. Таким как «порошок-в-трубе», «труба-в-трубе», «стержень-в-трубе». При создании ВТСП лент 1-го поколения используется значительное количество серебра, которому нет более дешевой альтернативы. Поэтому одним из минусов ВТСП лент 1-го поколения является то, что стоимость их снижаться не будет. Цена указанных лент в настоящий момент является достаточно высокой, и если не улучшить токонесущие свойства, то использование этих лент не дает большого экономического эффекта. Возможно, по этой причине некоторые компании остановили производство лент 1-го поколения, и сосредоточились на лентах 2-го поколения.

ВТСП ленты 2-го поколения представляют собой многослойную структуру (рис. 1.1б), в общем виде создаваемую в одном и том же порядке: подложка (~ 100 мкм), буферные слои (~ 1 мкм), сверхпроводник (~ 2 мкм), серебро (~ 1 мкм). ВТСП ленты 2-го поколения имеют значительно более

высокую плотность тока, чем ВТСП ленты 1-го поколения, но технологии производства ВТСП лент 2-го поколения являются сложными и дорогостоящими.

Тем не менее, именно ВТСП на сегодня являются наиболее перспективными сверхпроводниками за счет выигрыша в условиях эксплуатации.

## 1.2. Анализ современных производителей высокотемпературных сверхпроводников.

Область применения высокотемпературных сверхпроводников обширна. За последнее десятилетие были созданы около десяти сильноточных кабелей из ВТСП лент [4], моторы для судов [5], произведены компактные магниты [6], а также специфические устройства, такие, как токоограничители [7].

Перспективность устройств на основе ВТСП лент признается во всем мире. Появились новые компании (SuperPower, SuperOx), специализирующиеся исключительно на производстве ВТСП лент, технике для этого производства, и разработке электротехнических устройств на основе производимых лент. Несмотря на появление новых производителей, давно известные на рынке компании (Sumitomo, Bruker) также наладили производство нового материала. В табл. 1.1 представлены некоторые производители ВТСП лент, а также поколение лент, которые они производят. Очевидно, что предпочтение отдается лентам 2-го поколения.

Табл. 1.1. Перспективные производители ВТСП лент [8].

| | HTS Type | Width (mm) | Stabilizer | Piece Length | Current Ic (4 mm) | Current Annual Capacity | Current Price $/kAm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **AMSC** | 2G | 4.8 +12+40 | Cu + Brass + SS Lamination | | 80- 100+ A | | |
| **Bruker** | 2G | 4 + 12+40 | Cu Plating | 1000m processing lengths; yielded unclear | 72-120A | | |
| **InnoST** | 1G | 4.2 | --- | | 110+ A | | |
| **Sumitomo** | 1G | 4 | --- | 1000+ m | 200A | 1000 km | **Now:** ¥10-15/ $125-187 **Target:** ¥5/ $62 |
| | 2G | 2 + 4 | Cu clad | 100+ m | 120-150A | | |
| **STI** | 2G | 10 (100mm) | Cu Plating | | 200+ A demonstrated | | |
| **SuNAM** | 2G | 4 + 12 (120mm) | Cu Plating Brass Lamin | 1000m demonstrated | 100A | 200 km | |
| **SuperPower** | 2G | 3 + 4 + 6 + 12 | Cu Plating | 50-300+ m routine production | 100-150A | | **Now:** $175-200 **Target:** <$30 |

Проводя расчет рентабельности применения ВТСП вместо обычных проводников, необходимо учитывать возможности используемых сверхпроводников, их токонесущие свойства. Главной характеристикой ВТСП ленты является критический ток – максимальный ток, при котором нет резистивных потерь. Стоимость лент рассчитывается как цена 1 кА за один метр длины ($/kA·m). Исходя из такой оценки, есть два выхода снижения цены ВТСП лент: 1) понижение стоимости производства и материалов, затрачиваемых на производство, 2) повышение токонесущих свойств лент. На данный момент этими вопросами занимается ряд компаний, выпускающих ВТСП ленты в больших масштабах.

Как говорилось выше, стоимость ВТСП ленты можно уменьшить, если использовать ее максимально эффективно под конкретные задачи. Если повысить плотность тока, то возможно, при той же стоимости материала, лента станет рентабельнее.

В зависимости от требований к электротехническому устройству, на ведущую роль выходят те или иные параметры. Например, если подходит

лента с критическим током 100 А за 50 $/кА·м, то отсутствует необходимость в приобретении ленты 150 А за 100 $/кА·м, несмотря на то, что показатель критического тока у неё лучше. Поэтому в настоящей работе ставится задача не столько определения лучшей ленты, сколько анализа характеристик всех полученных ВТСП лент, и использование этой информации для дальнейшего проектирования устройств.

В ходе работы измерения проводились на ВТСП лентах следующих фирм:

- American Superconductors (AMSC)
- Super Power (SP)
- Sumitomo Electric Industries, Ltd. (SEI)
- SuperOx
- SuNAM

Эти компании производят ВТСП ленту в промышленных масштабах, из их лент уже были созданы электротехнические устройства, некоторые из которых внедрены в реальные подстанции и технику. Стоит отметить, что все компании в той или иной степени являются производителями ВТСП лент 2-го поколения, а производство ВТСП лент 1-го поколения из исследованных компаний осталось только у Sumitomo.

Использование сверхпроводимости возможно только в условиях низких температур, что значительно ограничивает возможности применения. Тем не менее, для многих областей сверхпроводящие электротехнические устройства являются перспективными, а зачастую, и незаменимыми. На сегодняшний день имеются примеры включения сверхпроводящих устройств в подстанции [9]. Магнитные томографы, внесшие огромный вклад в медицину, являются одним из самых больших потребителей сверхпроводников. Такие широко известные международные проекты, как ИТЕР и ЦЕРН, решающие глобальные задачи и проблемы физики, выводящие науку на новый этап, стали возможны исключительно благодаря сверхпроводникам. Но самым успешным направлением в ВТСП являются

силовые кабели, созданные и внедренные в подстанции в Америке, Азии, Европе и России [4, 10].

### 1.3. Характеристики ВТСП.

#### 1.3.1. Критический ток.

Как говорилось выше, главной характеристикой ВТСП ленты является её критический ток – ток, при котором материал из сверхпроводящего состояния переходит в нормальное. Экспериментальным путем было выведено главное уравнение критического тока сверхпроводников [11]:

$$E = E_0(I/I_c)^n, \quad (1)$$

где $E$ – напряженность на ленте, $E_0$ – критерий критического тока, принят за 1 мкВ/см, $I$ – транспортный ток в ленте, $I_c$ – критический ток, и $n$ – параметр нарастания. Именно этой формуле соответствует вольтамперная характеристика на ВТСП лентах. Отсюда критический ток находится по вольтамперной характеристике, когда напряженность $E_0$ равняется 1 мкВ/см по общепринятому критерию (рис. 1.2). Метод измерения, когда с помощью двух потенциальных контактов снимается напряжение с ленты, а с помощью двух токовых контактов вводится ток в ленту, и по построенной ВАХ определяют критический ток, называется четырех-контактным.

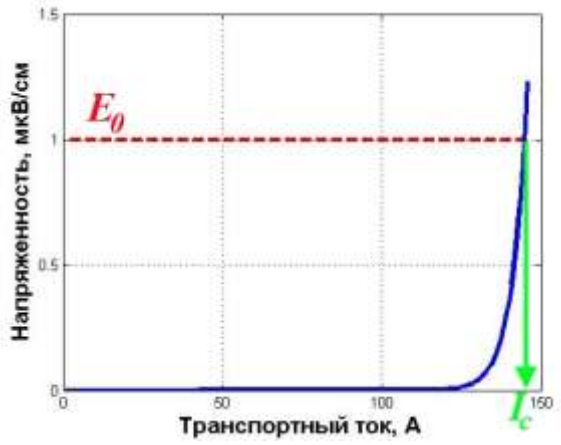



Рис. 1.2. Вольтамперная характеристика сверхпроводника.

ВТСП лента является сложным композиционным материалом, и соблюсти однородность материала по всей длине очень сложно. Из-за этого на протяжении длины ВТСП ленты наблюдается разброс значений критического тока, и длина пригодных для применения в устройствах ВТСП лент ограничивается провалами критического тока. Для создания электротехнических устройств, требующих длины проводника больше, чем может позволить ВТСП лента, применяют соединения ВТСП лент [9]. На сегодняшний день соединенные ВТСП ленты уже реализованы в таких крупнейших проектах по прикладной сверхпроводимости, как AmpaCity[9] и Yokohama [12].

Большинство уже произведенных силовых кабелей созданы на основе ВТСП лент 1-го поколения, а также планируется создание нового силового кабеля на основе этого типа лент в Японии по проекту «Ishikari» к 2017 году [13]. Поэтому исследование соединения ВТСП лент 1-го поколения весьма актуально. Самое простое соединение двух лент – внахлест. В случае ВТСП ленты 1-го поколения, данное соединение является оптимальным. Для ВТСП лент 2-го поколения ситуация иная. Структура таких ВТСП лент несимметричная, сверхпроводящий слой расположен ближе к одной поверхности, а к другой примыкает подложка. При исследовании перетекания токов при различных соединениях («сверхпроводник–сверхпроводник», «сверхпроводник–подложка», «подложка–подложка») было показано, что оптимальным вариантом является, когда сверхпроводник находится ближе к сверхпроводнику (рис. 1.3) [14].

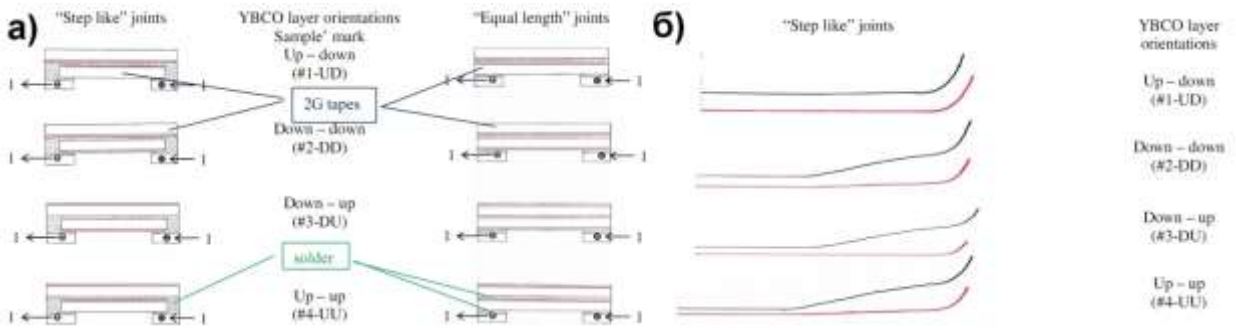



Рис. 1.3. Виды соединения ВТСП лент 2-го поколения в зависимости от расположения слоя сверхпроводника (а) и полученные вольтамперные характеристики для разных видов соединения (б) [14].

Поэтому для ВТСП лент 2-го поколения рассматриваются варианты соединения, когда ВТСП ленты будут находиться друг к другу стороной, где сверхпроводящий слой ближе к поверхности (рис. 1.4) [15].

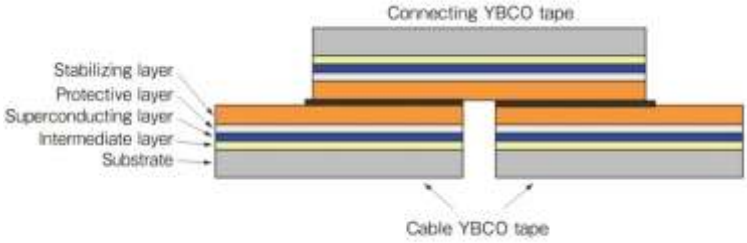



Рис. 1.4. Соединение ВТСП лент 2-го поколения типа «мост» [15].

В случае силового кабеля смена ориентации сверхпроводящего слоя приведет к потерям.

### 1.3.2. Устойчивость ВТСП лент к изгибам.

Во множестве электротехнических устройств (кабель, трансформатор, мотор и др.) лента подвергается деформации. Как показано выше, ВСТП лента является сложной составной конструкцией, и в результате изгиба ленты изменяются ее токонесущие способности, поэтому при оценке свойств ВТСП ленты была введена величина минимального диаметра изгиба – это тот диаметр, при изгибе на который критический ток падает не ниже значения 0.95 от критического тока ленты без какого-либо воздействия.

Соответственно, чем ниже минимальный диаметр изгиба, тем более гибкая лента.

В работах [16, 17] авторы проводили измерения минимального диаметра изгиба для анализа возможности применения ВТСП ленты в заданном соленоиде. В обеих работах измерения проводились при помощи специальных наконечников, изогнутых на определенные диаметры (рис. 1.5).

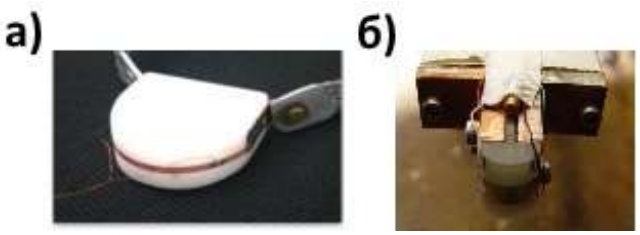



Рис. 1.5. Наконечники для измерения критического тока изогнутого образца, представленные в работах [16] (а) и [17] (б).

Как можно видеть, измерение проводится по четырех-контактному методу: измеряется транспортный ток, и напряжение на ленте в месте изгиба. В итоге по результатам измерений получают вольтамперную характеристику для каждого диаметра изгиба (рис. 1.6), и уже по ней определяют критический ток изогнутой ленты.

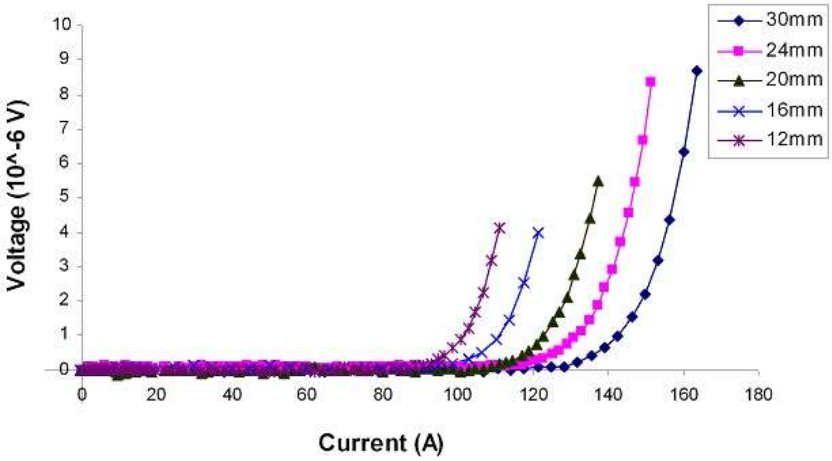



Рис. 1.6. Вольтамперные характеристики BSCCO-2223 ленты после изгиба на определенный диаметр [17].

В работе [18] прослеживается, что ВТСП ленты 2-го поколения являются более гибкими, чем ленты 1-го поколения. В этом их значительное преимущество.

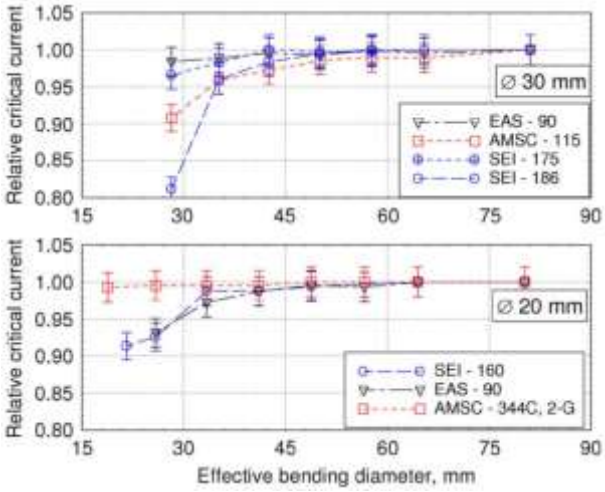



Рис. 1.7. Минимальный диаметр изгиба для различных ВТСП лент [18].

В случае намотки ленты в кабеле, происходит не только изгиб ленты, но и её скручивание. Для получения подробных данных о том, как себя лента будет вести именно в кабеле, измерения проводятся на имитирующем намотку кабеля формере [19], на который ВТСП лента наматывается с определенным шагом (рис. 1.8).

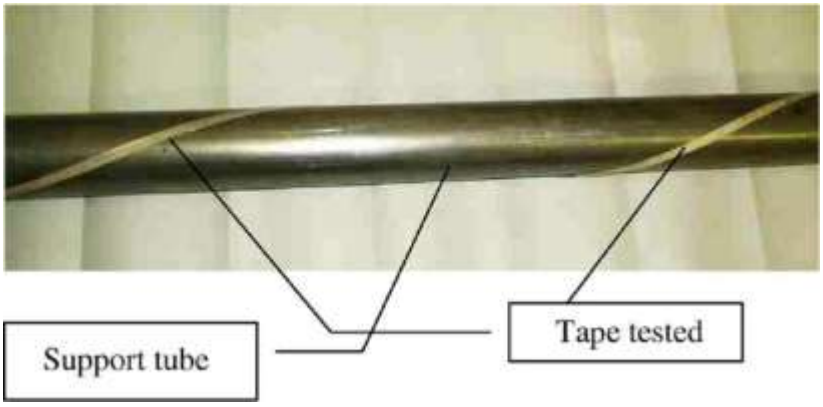



Рис. 1.8. Намотка ВТСП ленты на формер [19].

При определении минимального шага намотки применяется тот же критерий, что и для изгиба – 95% от критического тока недеформированной

ленты. В работе [19] представлены результаты для нескольких исследованных лент. Как видно на рис. 1.9, на формере диаметром 20 мм шаг более 20 см является применимым для всех лент. Но при шаге 15 см у сильноточной ленты 1-го поколения компании Sumitomo (186 А) критический ток резко падает ниже критерия. На формере 20 см картина повторяется, только в данном случае самой надежной оказывается лента AMSC 344C (2-е поколение).

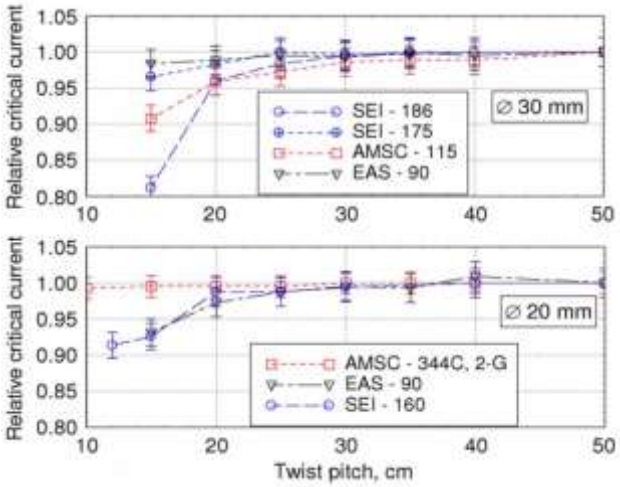



Рис. 1.9. Определение минимального шага намотки для различных ВТСП лент на диаметрах формера 30 мм и 20 мм [19].

В общем случае гибкость лент 2-го поколения лучше, чем лент 1-го поколения, что прослеживается в исследовании минимального шага намотки (рис. 1.10 [19]).

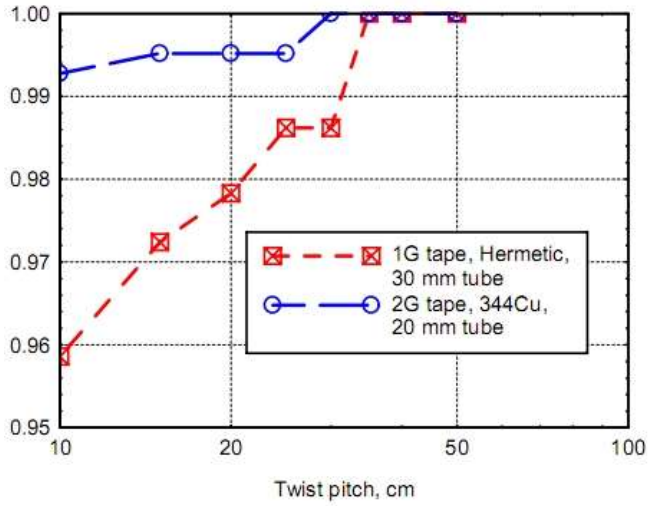



Рис. 1.10. Сравнение минимального шага намотки для ВТСП лент 1-го (красные квадраты) и 2-го (синие кружки) поколений [19].

Как можно видеть на приведенных примерах, в исследовании токонесущих свойств ВТСП лент принимают участие множество лабораторий по всему миру. Данная область исследований несет большую практическую значимость.

### 1.3.3. Анизотропия критического тока ВТСП лент от внешнего магнитного поля.

В электротехнических устройствах всегда присутствует внешнее магнитное поле: как собственное, так и создаваемое соседними сверхпроводящими лентами. Причем, внешнее магнитное поле может иметь разную величину – от десятых долей Тесла до нескольких Тесла. При анализе ленты перед использованием в том или ином устройстве, для более точной оценки важно знать поведение ленты в магнитном поле.

Влияние внешнего магнитного поля на критический ток ВТСП ленты для некоторых устройств является определяющим фактором, и может забраковать ВТСП ленту для данного применения, несмотря на прекрасный критический ток и гибкость ленты. Поэтому многие лаборатории проводят эти эксперименты.

Наиболее простым и эффективным способом получения значения критического тока ВТСП ленты во внешнем магнитном поле является описанный ранее четырех-контактный метод. Процесс получения и обработки данных происходит также как и в случае измерения критического тока в отсутствие внешнего воздействия. Главная сложность заключается в размещении образца во внешнем магнитном поле, и для решения этой задачи большинство лабораторий используют специальные вставки-держатели (рис. 1.11 [20]), на которых ВТСП ленты фиксируются и вносятся во внешнее магнитное поле (рис. 1.12 [21]).

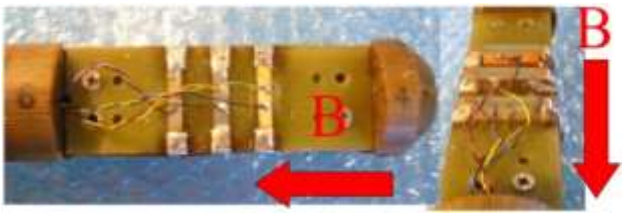



Рис. 1.11. Наконечник вставки-держателя для измерения критического тока во внешнем магнитном поле, с прикрепленной ВТСП лентой [20].

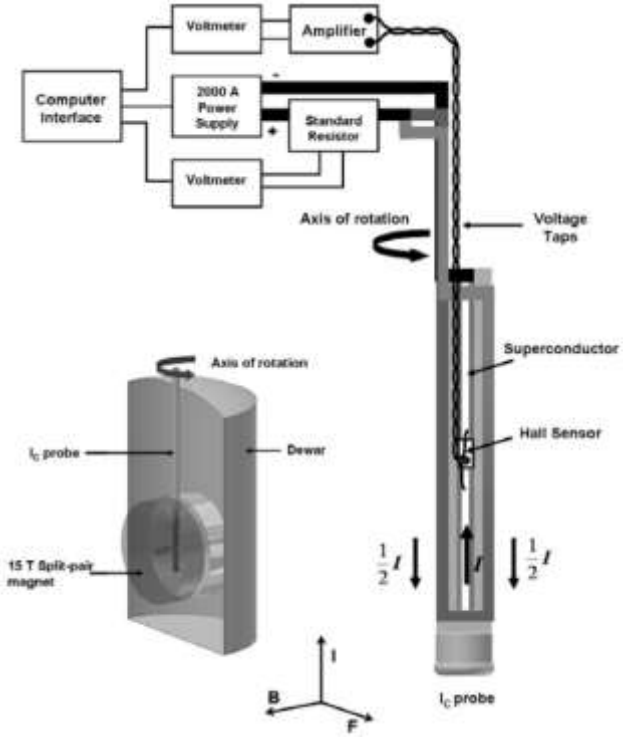



Рис. 1.12. Схема установки для измерения влияния внешнего магнитного поля на критический ток сверхпроводящей ленты [21].

Обычно при анализе поведения ленты во внешнем магнитном поле ограничиваются лишь параллельным и перпендикулярным полями [20] - взаимное расположение, наиболее ярко показывающее анизотропию критического тока во внешнем поле. Наиболее отчетливо разница в

поведении ВТСП 1-го и 2-го поколений видна в работе [18]. Авторы проводили измерения для сравнения свойств лент двух поколений. Измерения в поле проводились для двух крайних случаев: перпендикулярное (рис. 1.13, слева), и параллельное (рис. 1.13, справа).

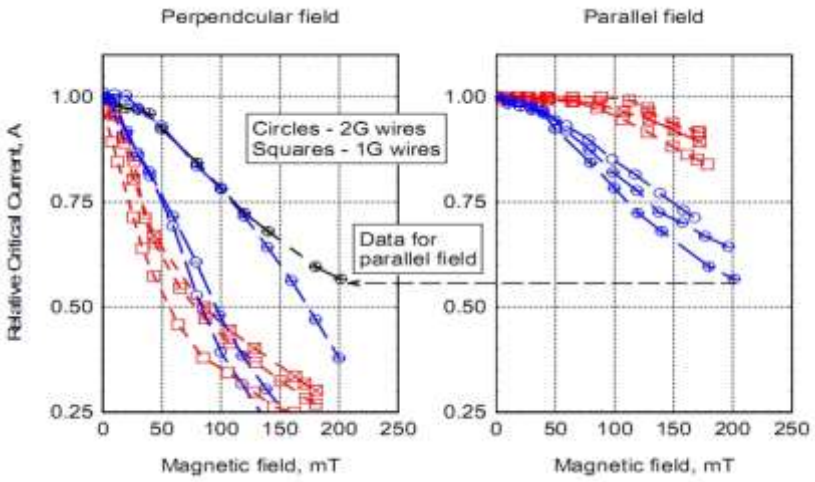



Рис. 1.13. Сравнение зависимости относительного критического тока от внешнего магнитного поля ВТСП лент 1-го (1G, красные квадраты) и 2-го поколений (2G, синие кружки) в: слева: перпендикулярном поле; справа: параллельном поле [18].

Отчетливо видно, что анизотропия свойств у лент 1-го поколения проявляется сильнее, чем у лент 2-го поколения. В перпендикулярном поле происходит резкое спадание относительного критического тока у лент 1-го поколения. Зато в параллельном поле вплоть до 70 мТл не происходит никакого спада у всех образцов 1-го поколения. Это характеризует ленты 1-го поколения как прекрасный материал силовых кабелей, для которых как раз характерно параллельное поле порядка 50 мТл.

### 1.4. Распределение плотности тока по сечению ВТСП лент и особенности поведения критического поля во внешнем магнитном поле.

При измерении поведения критического тока ВТСП лент от направления внешнего магнитного поля принято считать зависимость симметричной относительно перпендикулярного и параллельного

расположения внешнего магнитного поля к поверхности ленты. Но как показывают эксперименты, это условие не всегда выполняется. В работе [22] наблюдалась аномалия в поведении критического тока в сверхпроводящих тонких пленках 2-го поколения малых размерностей, и данное явление автором было названо «вихревым диодом». При пропускании тока через тонкую сверхпроводящую пленку, находящуюся во внешнем магнитном поле, критический ток оказывается разным при разных направлениях транспортного тока (рис. 1.14). Авторы подмечают зависимость значения критического тока от направления силы Лоренца.

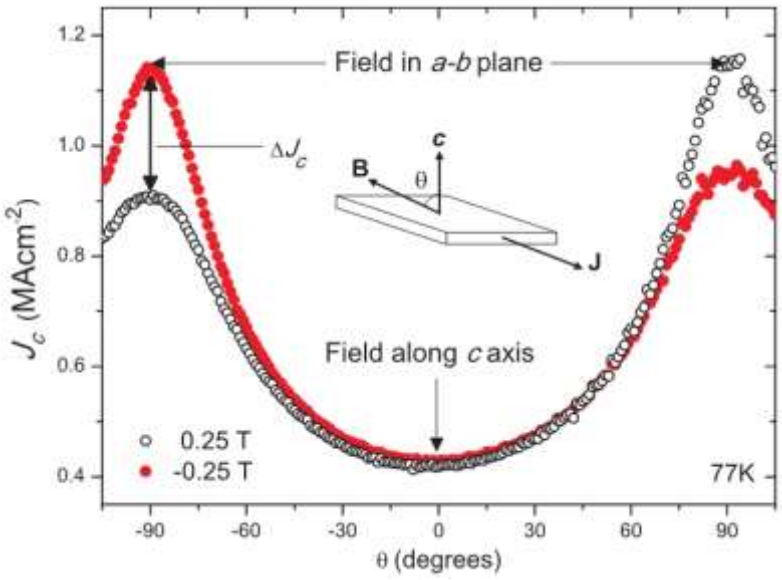



Рис. 1.14. Критический ток 500-нм YBCO пленки с добавками тантала, находящейся в параллельном внешнем магнитном поле разной направленности величиной 0,25 Тл [22].

При увеличении внешнего магнитного поля разница в значениях критического тока в зависимости от полярности поля сглаживается (рис. 1.15) [23].

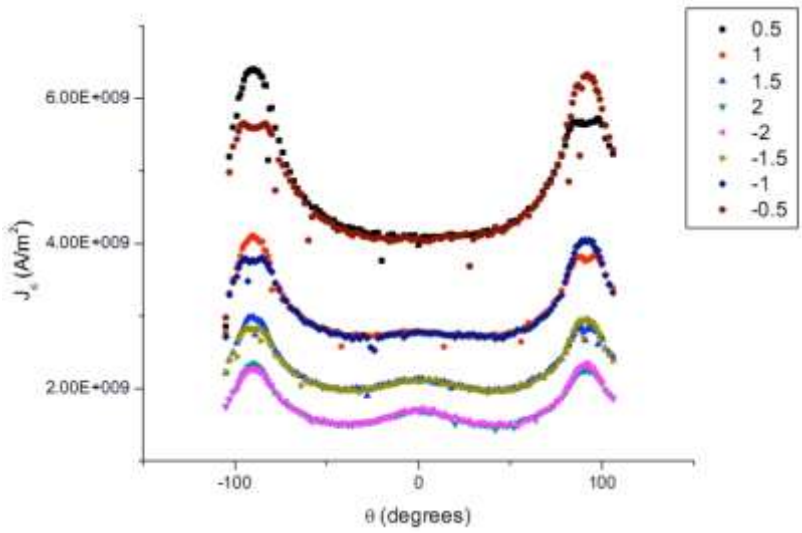



Рис. 1.15. Критический ток 500 нм YBCO пленки с добавками тантала, находящейся в различных параллельных внешних магнитных полях разной направленности [23].

Стоит отметить, что несимметричность наблюдалась и ранее другими лабораториями, но никто не акцентировал на ней внимания (рис. 1.16) [44]. Авторы порой ссылались на ошибку измерений, и, не имея объяснений данному явлению, не публиковали.

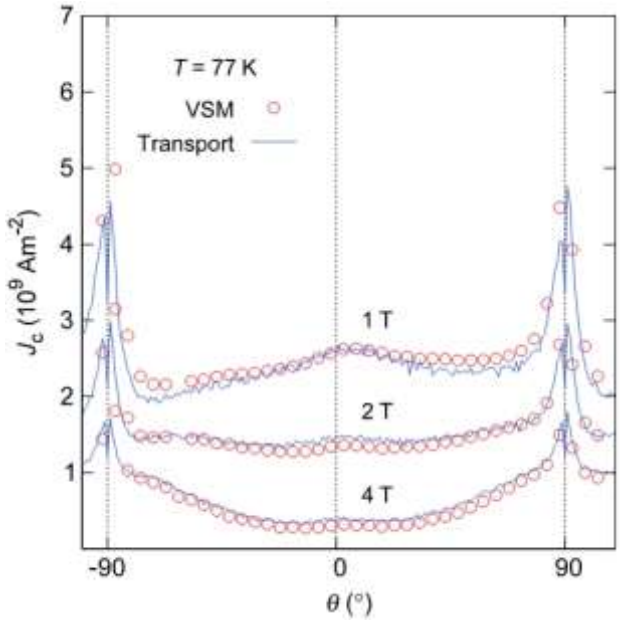



Рис. 1.16. Угловая зависимость критического тока ВТСП ленты в различных внешних магнитных полях.

При определенных условиях разница в значениях критического тока может достигать значительных величин, что может существенно сказаться на устройствах, работающих во внешнем магнитном поле. Природа данного явления не объяснена. Некоторые авторы приписывают эффект особенностям появляющейся вихревой решетки [22].

В случае, когда ток распределен по ширине равномерно или симметрично, в какую бы сторону ни действовала сила Лоренца, всегда будет одно и то же значение критического тока. Но в реальности добиться такой идеальной пленки, тем более в лентах длиной несколько километров, крайне сложно. Отсюда наличие дефектов в ВТСП лентах представляется само собой разумеющимся. В работе [25] произведен расчет распределения плотности тока $J_c$ по ширине ленты (рис. 3).

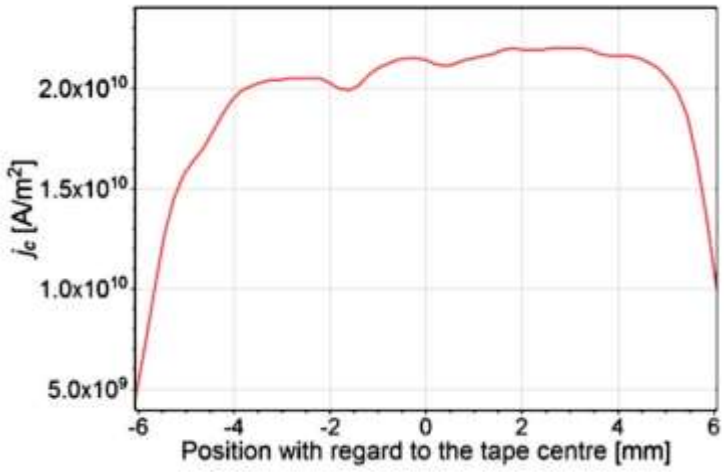



Рис. 1.17. Распределение плотности критического тока $J_c$ по ширине 12 мм ВТСП ленты 2-го поколения, представленное в работе [25].

Результаты показали несимметричность распределения; авторы обосновали это наличием дефектов, фотография которых представлена на рис. 1.18.

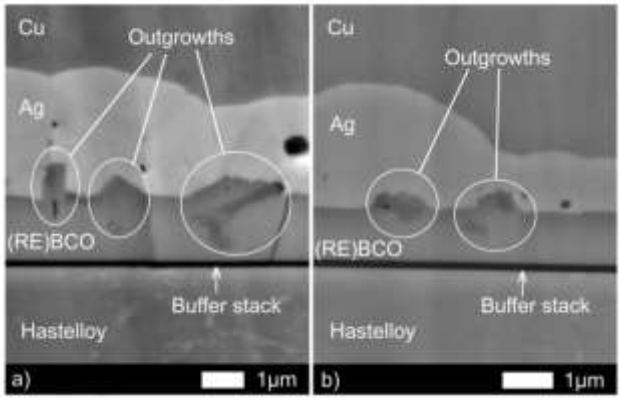



Рис. 1.18. Микрофотография ВТСП ленты 2-го поколения SCS4050, представленная в работе [25]

Методы измерения распределения плотности тока по ширине ленты известны уже давно и используются много лет. Это прекрасный способ анализа свойств ленты и качества ленты. В этой главе мы будем рассматривать только те способы анализа, которые называются non-destructive (не разрушающие). Все они основаны на измерении создаваемого протекающим током собственного поля и дальнейшим переводом из поля в ток [26]:

- Сканирующий датчик Холла: метод заключается в измерении магнитного поля датчиком Холла, расположенном на подвижном механизме. При данном методе образец может находиться во внешнем магнитном поле. При таком измерении получаются результаты с хорошим разрешением и большой точностью, но он является не таким быстрым, как магнитно-оптическое отображение.
- Массив датчиков Холла: последовательность нескольких датчиков Холла позволяет измерять магнитное поле одновременно в нескольких точках. Данный метод является очень быстрым, но разрешение крайне мало, и велика погрешность из-за расположения датчиков Холла вручную.

За счет отсутствия сопротивления распределение тока по ширине в сверхпроводящей ленте отличается от обычного проводника. Общеизвестно, что заряды по металлу при постоянном токе распределяются равномерно по всему сечению. В сверхпроводниках же, как предположил Бин [27], распределение тока имеет более сложную зависимость. В основе модели Бина-Лондона лежит предположение, что при любом изменении тока или поля в образце на его поверхности индуцируются экранирующие токи, плотность которых не может превышать критическое значение $J_c$. При достижении на некотором участке критического значения плотности тока магнитный поток начинает проникать в области образца, более удаленные от его поверхности, что в свою очередь приводит к индуцированию в них экранирующих токов. Была выведена формула для токов внутри сверхпроводника:

$$\frac{I}{I_c} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} arctg\left\{(r/R)[(R^2 - b^2)/(b^2 - r^2)]^{1/2}\right\}, 0 \le r \le b \\ 1,\ b < r < R \end{cases}. \quad (2)$$

Или в переложении на случай сверхпроводящей ленты имеем [28]:

$$J(y) = \begin{cases} \frac{2J_c}{\pi} \arctan\left(\frac{a^2 - b^2}{b^2 - y^2}\right)^{1/2}, & |y| < b \\ J_c, & b < |y| < a \end{cases}. \quad (3)$$

Здесь мы видим, что ток начинает проникать в ленту с краев, и, по мере приближения значения транспортного тока к критическому, разница в значениях на краях и в середине ленты уменьшается (рис. 1.19).

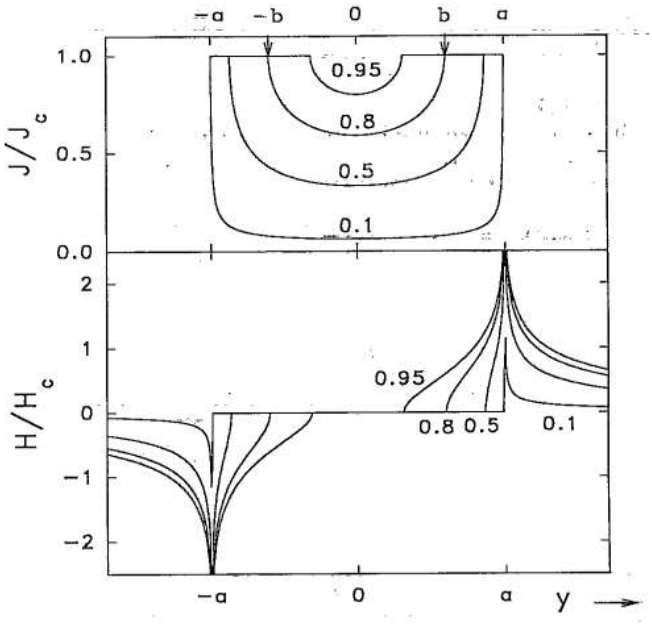



Рис. 1.19. Распределение относительной плотности тока (сверху) и относительного собственного магнитного поля (снизу) по ширине сверхпроводящей ленты при вводе тока [28].

По достижении значения критического тока, распределение в ленте по ширине становится равномерным. При повышении тока распределение продолжается быть равномерным, так как фактически материал перешел из сверхпроводящего состояния в нормальное. Также в работе [28] описывается механизм распределения заряда при выводе тока из ленты:

$$J(y) = J_c - J_c \frac{2}{\pi}\left(\frac{b^2-y^2}{a^2-b^2}\right)^{1/2}, \quad |y| < b\,, \tag{4}$$

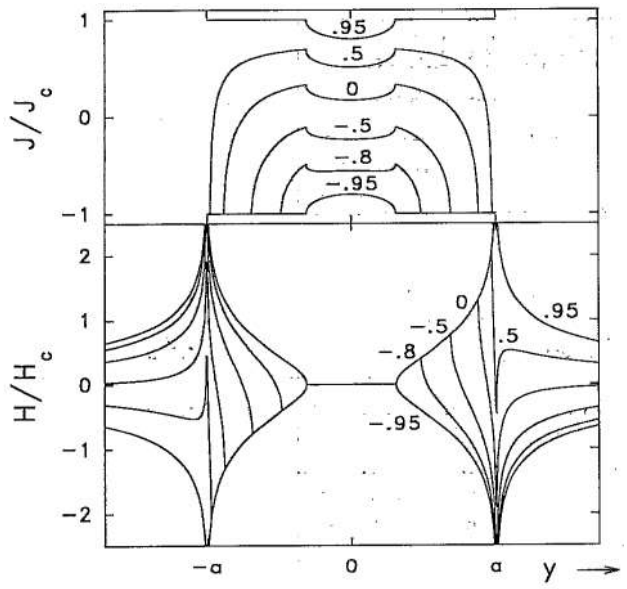



Рис. 1.20. Распределение относительной плотности тока (сверху) и относительного собственного магнитного поля (снизу) по ширине сверхпроводящей ленты при выводе тока [28].

Как видим на рисунке 1.20, ток по краям уменьшается интенсивней, чем посередине. И в момент, когда транспортный ток становится равным нулю, фактически в ленте остается собственный ток, суммарно равный нулю, но при этом создающий собственное поле ленты. Именно этим и объясняется остаточный ток.

Одним из наиболее популярных и точных методов измерения распределения токов по ширине сверхпроводника является измерение собственного поля сверхпроводящей ленты при помощи датчиков Холла и перевод поля в токи. На данной методике реализовано множество вариаций измерений, но перевод из поля в ток основан на одном и том же принципе.

В основу перевода положен закон Био-Савара-Лапласа, применяя который можно определить магнитное поле, создаваемое проводником:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I[\vec{r}\times d\vec{r}]}{r^3}, \qquad (5)$$

где $dB$ – магнитное поле на расстоянии $r$ от проводника с током $I$. В случае сверхпроводника распределение тока по сечению является неравномерным, и

поэтому сверхпроводящую ленту представляют в виде суммы параллельных полосок с протекающим по ним однородным по сечению током.

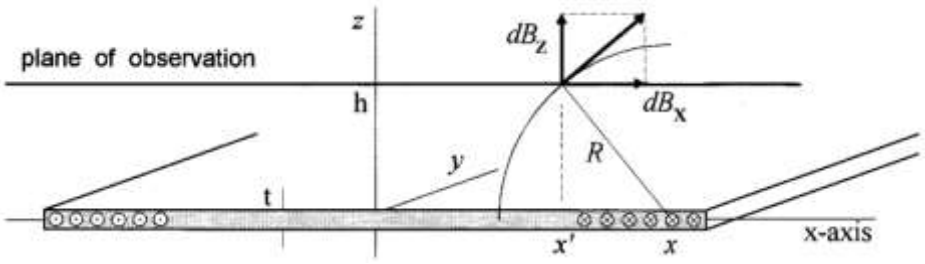



Рис. 1.21. Представление сверхпроводящей ленты в виде полосок, по которым протекает однородный по сечению ток [29].

Тогда суммарный ток ленты можно представить в виде суммы токов в каждой полоске, и на каждую точку пространства над лентой воздействует магнитное поле, просуммированное по влиянию тока в каждой полоске [30]:

$$B_k(x_j, y_0) = \sum_k A_{jk} i_k. \quad (6)$$

Таким образом, пришли к необходимости решения обратной задачи, когда $i_k$ является искомой величиной, $A_{jk}$ зависит от расположения датчика Холла, а $B_k$ измеряются. В работе [31] ставится задача создания алгоритма для преобразования наблюдаемого магнитного поля в ток. Авторы подробно описывают процесс измерения и снятия данных с датчика Холла, и затем преобразуют формулу, описывающую закон Био-Савара-Лапласа (1), в вид:

$$B_z(P) = \sum_{i=1}^{\tilde{n}} \left[\frac{\mu_0}{4\pi} ln \frac{(y_b - y_i)^2 + h^2}{(y_b - y_{i+1})^2 + h^2}\right] J_i \,, \quad (7)$$

где $y_i$ и $y_{i+1}$ значение тока в каждой полоске (рис. 1.22). Используя формулу (5) и зная значения поля $B_z$, решая систему линейных уравнений, находят $J_1$, …, $J_n$.

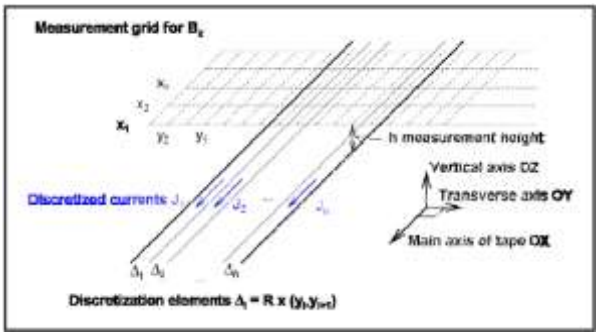



Рис. 1.22. Графическая диаграмма разбивания ленты на дискретные части [31].

В начале эксперимента авторы [31] проверили свой алгоритм перевода на вымышленном распределении (рис. 1.23, на котором красной линией показано программно заданное распределение, а синей линией – перерасчет). Как можно видеть, точность такого пересчета велика. Небольшое несовпадение замечается разве что в пике.

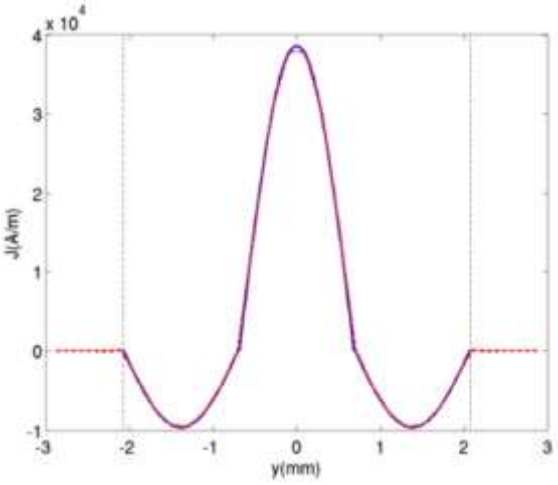



Рис. 1.23. Модель распределения плотности тока по ширине предполагаемой ВТСП ленты 2-го поколения (красная штриховая линия) и перерасчет (синяя сплошная линия) [31].

Затем авторы проверили свой алгоритм на реальной ленте. Для этого они замерили распределение собственного поля у ленты 2-го поколения компании SuperPower. Измерение распределения поля проводилось для трех случаев:

1. В захоложенную в жидком азоте ВТСП ленту вводились токи 5, 10, 20, 30, 50, 70, 80, 90, 100 и 110 А, и при каждом введенном токе измерялась вертикальная составляющая поля над лентой.

2. Затем выводили ток и по значениям тока 100, 80, 70, 50, 30, 20, 10 и 0 А также измеряли вертикальную составляющую собственного поля ленты.

3. Третьим этапом было измерение собственного поля при обратном токе. Для этого этапа выбрали следующие значения транспортного тока: -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90, -100 А.

Датчики Холла были расположены на расстоянии 80 мкм от ленты, и на расстоянии 104 мкм от сверхпроводящего слоя, и измерения проводились в 5 или 10 параллельных колонок, поперек ленты, на расстоянии 4 – 4,5 мм. Длина каждого поперечного измерения ленты составила 30 мм. Размеры активной зоны датчика Холла также приведены в [31]: 100×100 мкм$^2$. На рис. 1.24 представлены измерения собственного поля для 10 различных колонок. Авторы указывают, что разница поля между этими измерениями незначительна, что говорит об однородности ленты по длине.

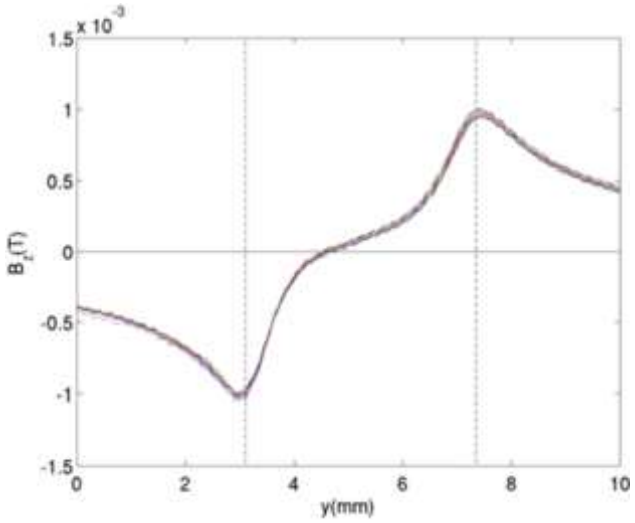



Рис. 1.24. Распределение собственного магнитного поля ВТСП лент 2-го поколения на разных участках одной ленты [31].

Далее авторы показывают результаты предложенного ими алгоритма перевода из поля в ток (рис. 1.25). На этом изображении авторы предоставили распределения для обратных токов -10 А (синяя линия), -30 А (желтая), -50 А (черная). Кроме того, для сравнения на рис. 1.25 была наложена линия для прямого измерения тока 50 А (зеленая линия), и распределение тока при транспортном токе 0 А, но после вывода тока из ленты (красная линия).

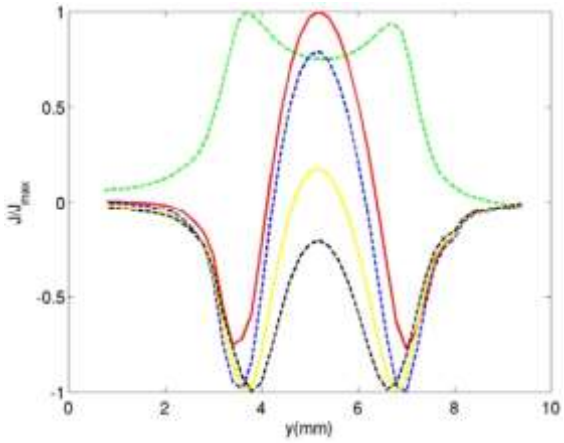



Рис. 1.25. Распределение плотности тока по ширине в ВТСП ленте 2-го поколения [31].

На основе известных научных работ видно, что измерение методом массива датчиков Холла дает качественные результаты. Но из-за небольшого количества точек измерения перевод из поля в ток является затруднительным, и решение обратной задачи дает сравнительно невысокую точность результатов. Поэтому были разработаны другие методы измерения распределения плотности тока, возможно, более трудоемкие и затрачивающие больше ресурсов, но дающие более точные результаты. К таким методам относится метод сканирующего датчика Холла.

В работе [32] проводилось измерение распределения плотности тока в ленте, находящейся в перпендикулярном магнитном поле. Для этого была собран специальный медный магнит, над которым закреплялась ВТСП лента

2-го поколения, и сверху снималось собственное поле ВТСП ленты за вычетом поля магнита (рис. 1.26).

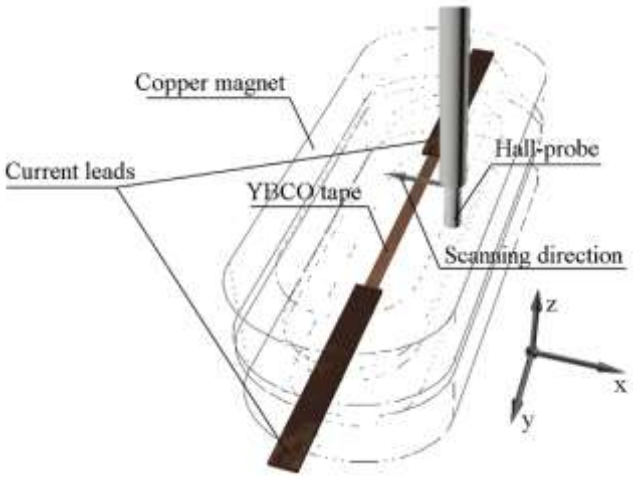



Рис. 1.26. Схема измерения собственного поля ВТСП ленты 2-го поколения, находящейся во внешнем магнитном поле [32].

Измерения распределения плотности тока по ширине были сделаны по представленной в работе [25] схеме. Всего было измерено три ВТСП ленты 2-го поколения шириной 6 миллиметров (рис. 1.27).

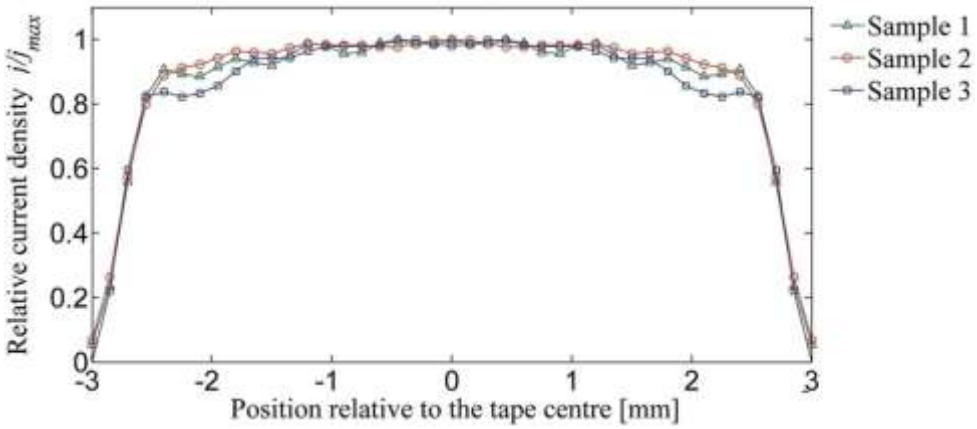



Рис. 1.27. Распределение относительной плотности тока по ширине 6-мм ВТСП ленты 2-го поколения [32].

На основании рассмотренных работ, можно сделать заключение, что измерение распределения плотности тока при помощи датчиков Холла

является общепризнанной достоверной методикой. Работы в этом направлении ведутся в других лабораториях, и результаты работ публикуются в международных рецензируемых изданиях. Такие результаты помимо научного интереса несут в себе и прикладное значение. В частности, при создании электротехнического устройства на основе катушки из ВТСП лент важно учитывать неоднородность ВТСП лент 2-го поколения по ширине [33]. Авторы анализируют, как различные неоднородные распределения плотности тока по ширине 12-мм ВТСП ленты повлияют на токонесущую способность всего устройства.

Измерение распределения плотности тока по ширине ВТСП ленты во внешнем магнитном поле позволит проектировать электротехнические устройства максимально приближенными к реальным условиям, и учитывать максимально точно влияние внешних факторов на токонесущие способности.

# ГЛАВА 2. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОНЕСУЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК.

## 2.1. Определение критического тока сверхпроводников.

Как было сказано в главе 1, основным параметром, определяющим пригодность применения сверхпроводящей ленты, является критический ток. Именно на нахождении этой величины построены большинство экспериментов со сверхпроводящими лентами.

Самым простым, и в то же время надежным методом является четырех-контактный метод. В этом методе измерений сверхпроводящая лента (рис. 2.1(1)) прикрепляется (в нашем случае, припаивается) на тоководы (рис. 2.1(2)). На саму ленту припаиваются два потенциальных контакта (рис. 2.1(3)), которые снимают напряжение с ленты.

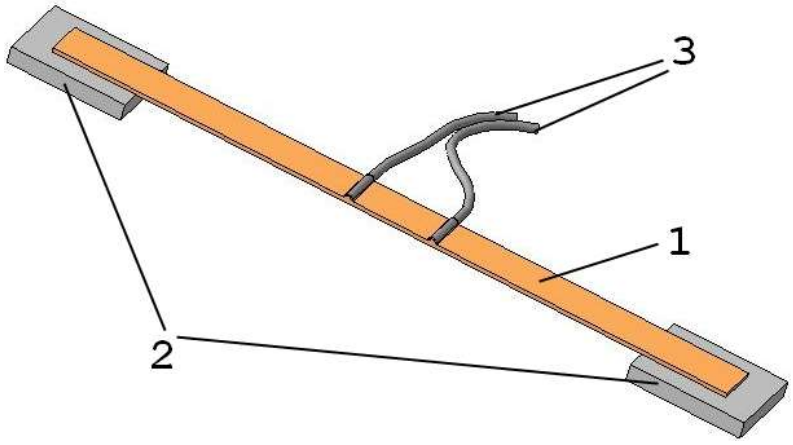



Рис. 2.1. Схематическое изображение четырех-контактного метода измерения критического тока на сверхпроводящих лентах: 1 – токонесущая лента; 2 – токовводы; 3 – потенциальные концы.

Зная расстояние между потенциальными контактами, напряженность берется как отношение напряжения между этим контактами, к расстоянию между ними. И ток, при котором эта напряженность равна определенному значению (0.1 мкВ/см, 1 мкВ/см), называется критическим. Наглядно обработка данных представлена на рис. 2.2. В случае практического применения, напряженность $E$ равняется отношению снимаемого с ленты

напряжения $U$ к расстоянию между потенциальными концами $l$. Значение транспортного тока $I$ также известно из снимаемой четырех-контактным методом вольт-амперной характеристики. Когда транспортный ток $I$ становится равным критическому значению $I_c$, то отношение $I/I_c$ равняется 1, и следовательно, $(I/I_c)^n$ тоже равняется единице. Поэтому, когда значение $U$ достигает величины 1мкВ/см × $l$, то значение транспортного тока соответствует критическому (рис. 2.2).

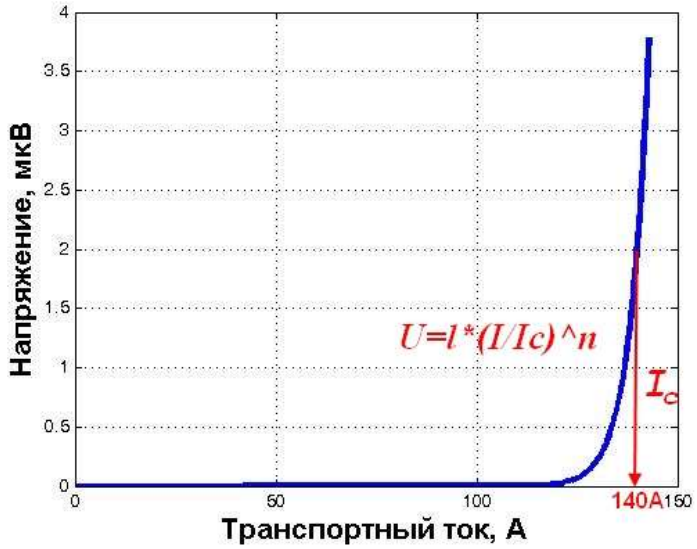



Рис. 2.2. Вольтамперная характеристика сверхпроводящей ленты.

В нашей лаборатории были созданы и введены в эксплуатацию специальные вставки-держатели для проведения экспериментов по нахождению критического тока, общий вид которых представлен на рис. 2.3. Наконечник выполняется из текстолита, что обеспечивает электроизоляцию и отсутствие деформации при работе в жидком азоте. Труба сделана из нержавеющей стали, и её назначение – увеличение длины вставки-держателя, чтобы образец можно было полностью опускать в хладагент в криостате, а также защита проводов, подводящихся к закрепленному образцу. В верхней части токовводы выполнены в виде болтов для подсоединения к источнику тока. На наконечнике токовводы представляют собой две пластины, на которые напаиваются сверхпроводящие образцы. Описанная конструкция

позволяет проводить измерения критического тока в хладагенте как в криостатах различного диаметра, так и прямо в сосуде Дьюара (как будет сказано дальше, также данная конструкция вставки-держателя позволяет проводить эксперименты во внешнем магнитном поле).

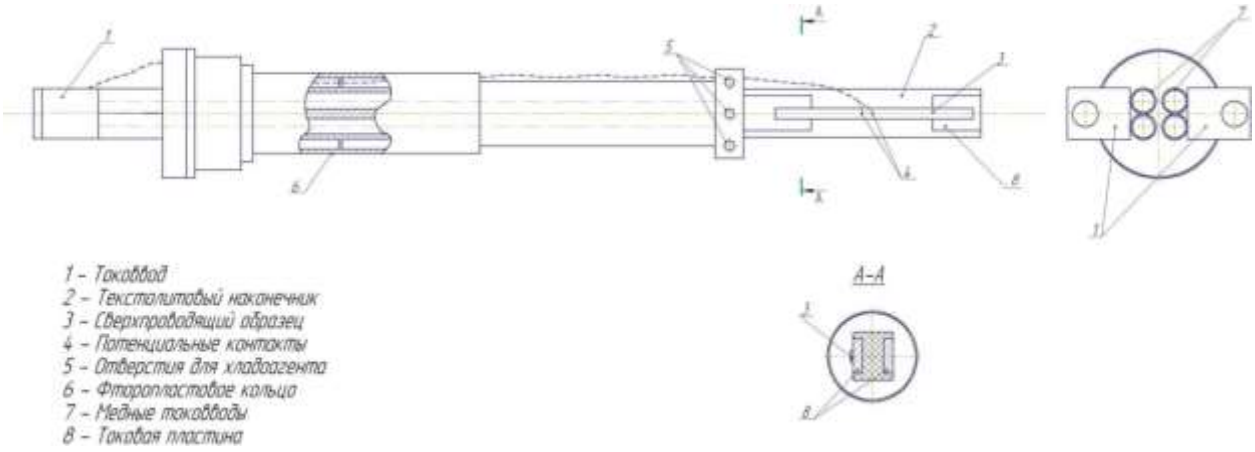



Рис. 2.3. Вставка-держатель для измерения критического тока сверхпроводящей ленты. На рисунке отмечены: 1 – токовводы; 2 – труба; 3 – наконечник.

Вставки-держатели в зависимости от задач и условий имеют большие различия во внешнем виде. Но все они сделаны по описанной выше схеме. Типичный вид вставки-держателя для измерения критического тока в криостате представлен на рисунке 2.4.

Рис. 2.4. Вставка-держатель для измерения критического тока сверхпроводящей ленты (а) и отдельно наконечник вставки (б).

При проведении эксперимента лента напаивается на токовводы на наконечнике вставки-держателя. На ленту напаиваются потенциальные концы, с которых снимается напряжение на ленте. Далее вставка-держатель (1) с прикрепленной к ней лентой опускается в криостат (2). К токовводам сверху подключается источник тока (3), а потенциальные концы подключаются к нановольтметру (4). В нашей лаборатории в качестве источника тока используются источники Agilent [34] разных модификаций, в зависимости от задач и от критического тока исследуемой ленты максимальный ток источника берется 160 А, 440 А и 1000 А. В качестве измерителя напряжения использовался сертифицированный нановольтметр Keithley 2182A [35]. Источник тока и нановольтметр подключаются к управляющему компьютеру (5), с которого производится управление приборами и на который снимаются данные. Далее по полученным данным строится вольтамперная характеристика, и по ней находится критический ток. Схема установки по измерению критического тока приведена на рис. 2.5.

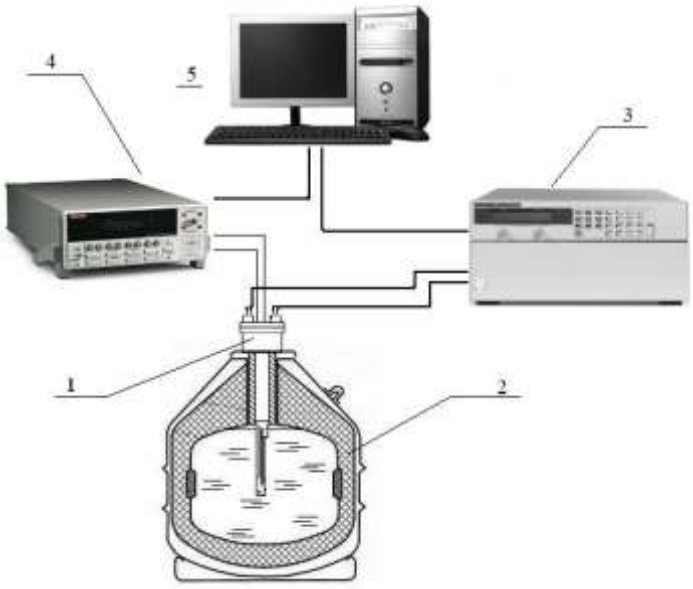



Рис. 2.5. Схема установки для определения критического тока сверхпроводящей ленты: 1) вставка-держатель; 2) криостат; 3) источник тока Agilent; 4) нановольтметр Keithley; 5) управляющий ПК.

Непосредственно автором была разработана и внедрена усовершенствованная программа по управлению приборами и обработке данных в среде LabVIEW. Код данной программы представлен в приложении А. В частности, раньше за ток в образце принималось значение, которое задавалось с компьютера на источник. Как показали эксперименты, это значение не всегда совпадает с истинным. В случаях, когда ток переставал вводиться в образец, запись задаваемых значений продолжалась. Во внедренной программе значение тока подается с самого источника, с его внутреннего шунта. Сравнение полученного непосредственно с источника тока и тока, полученного с внешнего вольтметра с шунта 75 мВ и 300 А, представлено на рис. 2.6.

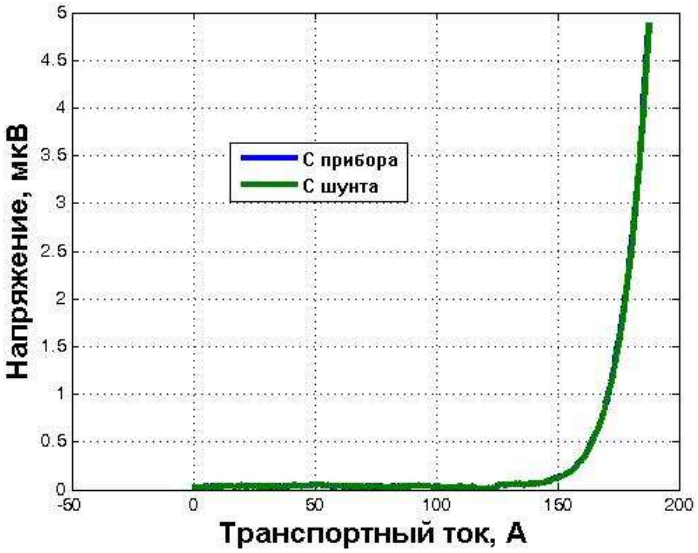



Рис. 2.6. Сопоставление вольтамперной характеристики, полученной с данных с прибора, и вольтамперной характеристики с внешнего шунта.

Как видим, данные полностью совпадают. Указанное выше нововведение позволило получать более точные данные, и облегчило работу, так как показания на панели источника тока и мониторе компьютера стали совпадать, поэтому отпала необходимость наблюдать за двумя приборами одновременно. Кроме этого, были добавлены: систематизация полученных данных по дате; защита от перезаписи полученных ранее данных из-за

совпадения имен; также созданы программы под каждый отдельный источник в зависимости от его тока и максимального напряжения. Главное нововведение созданной программы – это автоматическое определение критического тока образца. Ранее процедура определения критического тока проводилась при помощи дополнительной программы EasyPlot, в которой открывалась заснятая вольтамперная характеристика, и вручную определялся критический ток по критерию 1 мкВ/см. В разработанной программе расчет критического тока проводится при помощи встроенной в стандартный пакет LabVIEW оптимизации Левенберга-Маркгвардта по формуле (1). В нашем случае оптимизации используется более общая формула, учитывающая отклонение от нуля начальной точки:

$$U = E_0 l (I/I_0)^n + RI + d\ , \qquad (8)$$

где $U$– напряжение на потенциальных концах, $E_0$ – критерий критического тока, равный 1 мкВ/см, $l$ – расстояние между потенциальными концами, $I$ – транспортный ток в образце, $I_c$ - критический ток, $R$ – резистивное сопротивление (для случая соединения лент при помощи спая), $d$ – отклонение от нуля в начальной точке (значение близко к нулю). Используя данную оптимизацию, получаем данные с наибольшей точностью. Панель программы с выполнением расчетов представлена на рис. 2.7.

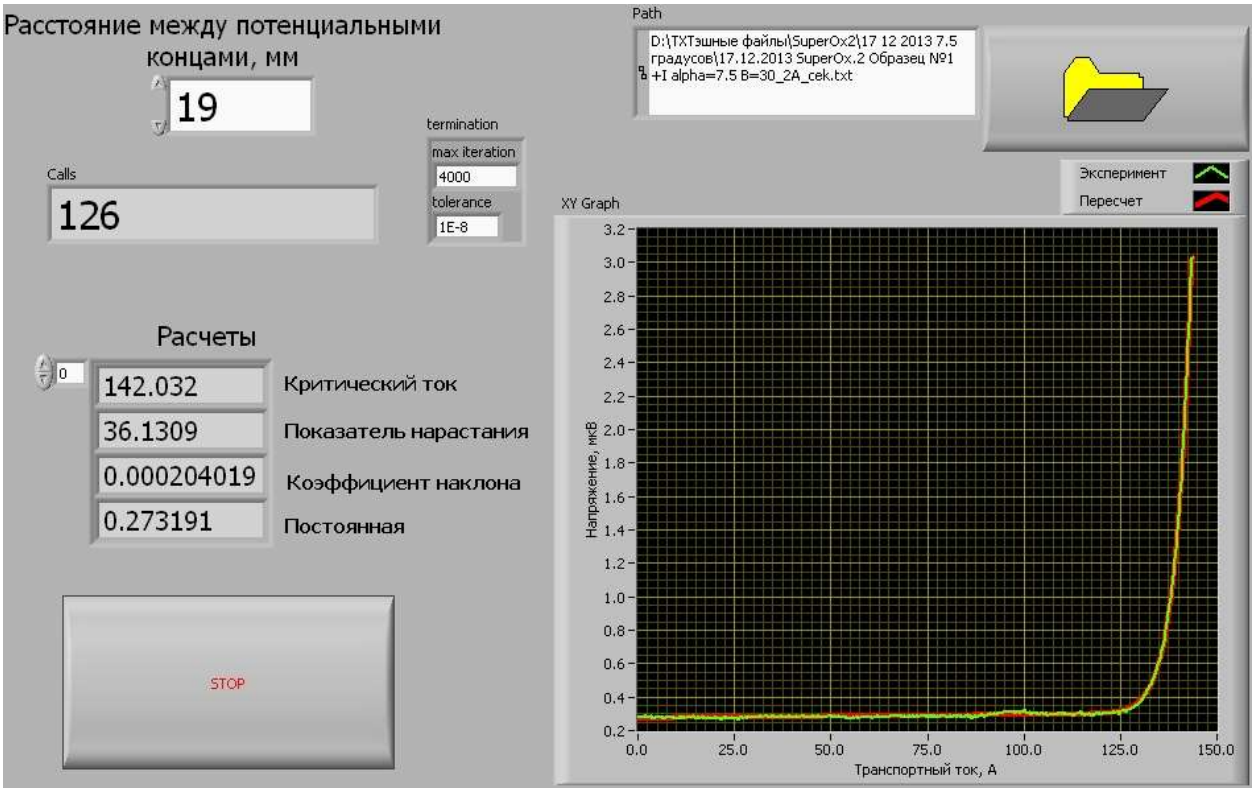



Рис. 2.7. Панель программы для расчетов характеристик ВТСП ленты.

В нашей лаборатории отработаны методики измерения критического тока. Результаты работ публиковались в рецензируемых изданиях и представлялись на международных конференциях. В ходе работы методика измерения критического тока была автоматизирована и увеличена точность измерений. Разработанная программа позволяет проводить значительно измерения массово при большей точности результатов.

### 2.2. Исследование устойчивости ВТСП лент к изгибам.

Критический ток в предыдущем разделе – это критический ток недеформированных прямых лент. В реальных же условиях, при создании таких устройств, как кабель, магнит, трансформатор и другие происходит деформация ленты. При проектировании любого устройства необходимо рассматривать характеристики ленты для конкретного случая. Именно для анализа характеристик в реальных условиях эксплуатации ВТСП лент проводятся измерения критического тока деформированных лент.

Все производители приводят в документации к своим лентам такую характеристику как минимальный диаметр изгиба. Это диаметр, при котором критический ток не меньше, чем 95% критического тока недеформированной ленты. В нашей лаборатории разработана методика для проведения измерений устойчивости ВТСП лент к изгибам.

На момент начала работ нахождение минимального диаметра изгиба проводилось при помощи специального измерительного конуса, представляющего собой набор кругов определенного диаметра, вырезанных из цельного материала (рис. 2.8).

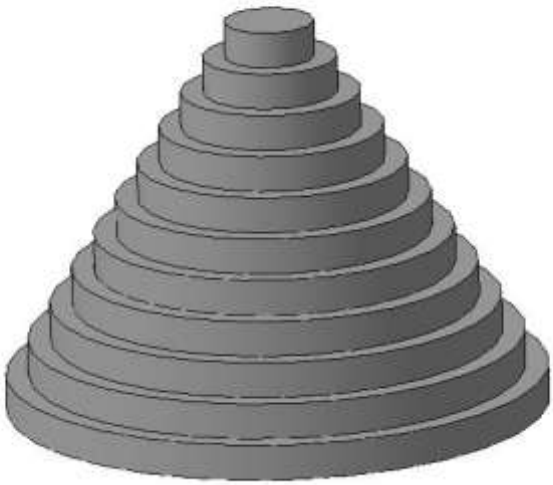


Рис. 2.8. Измерительный конус различных диаметров.

Недостаток данного метода заключается в том, что после изгиба ленту напаивали на вставку-держатель в разогнутом виде. В отличие от реального устройства, фактически сгибали и разгибали ленту, а не проводили измерения на изогнутой ленте. В связи с этим встала задача найти и реализовать способ проведения измерений изогнутых образцов без распрямления.

В нашей лаборатории были разработаны специальные наконечники различного диаметра и универсальная вставка-держатель (рис. 2.9). При использовании данных наконечников, лента напаивается на токовводы.

Получается изгиб ленты по центру на необходимый диаметр. В местах изгиба ленты напаиваются потенциальные концы. Затем наконечник медными токовводами прикручивается при помощи болтов к токовводам вставки-держателя. Дальнейшие измерения проводятся аналогично описанным в пункте 2.1. В этом методе измерения проводятся при условиях максимально приближенных к реальной эксплуатации ленты в электротехническом устройстве, поэтому можно с большой вероятностью заявлять о поведении лент в реальном электротехническом устройстве.

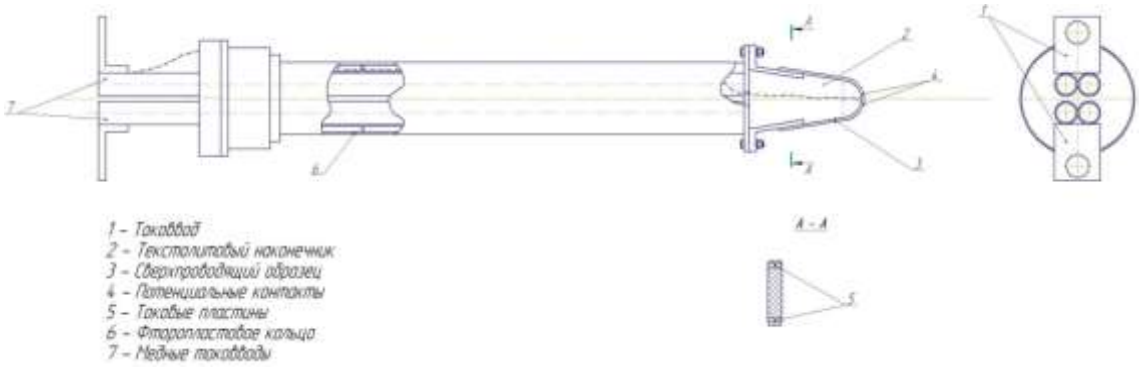



Рис. 2.9. Схема вставки-держателя для измерения критического тока изогнутой ВТСП ленты.

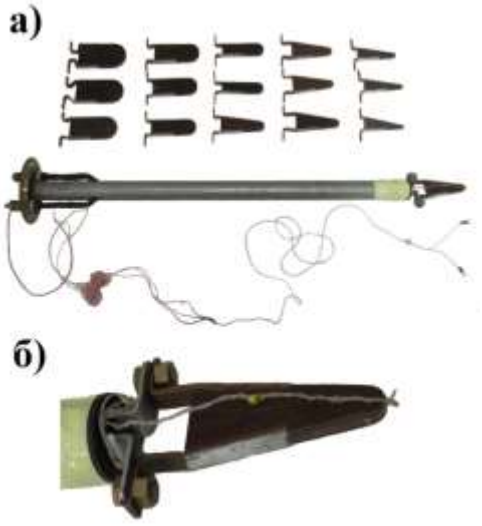



Рис. 2.10. Разработанная в лаборатории специальная вставка-держатель для измерения критического тока после изгиба со съемными наконечниками (а) и отдельно наконечник с закрепленной на нем ВТСП лентой (б).

Как уже говорилось, каждый производитель заявляет в документации минимальный диаметр изгиба. Стоит также отметить особенности строения лент и связанные с этим различия. ВТСП ленты 1-го поколения, созданные по классическим металлургическим методам («порошок-в-трубе», «труба-в-трубе», и др.) являются абсолютно симметричными. ВТСП ленты 2-го поколения, получаемые путем осаждения сверхпроводника на подложку, напротив, имеют несимметричное строение. То есть с одной стороны у них сверхпроводящий слой ближе к поверхности, чем с другой. Вследствие этого изгиб в разную сторону может оказывать разное воздействие, поэтому для лент 2-го поколения проводятся два вида экспериментов: на сжатие и на растяжение сверхпроводящего слоя (рис. 2.11).

Рис. 2.11. Поведение слоев ВТСП ленты 2-го поколения в случае: а) сжатия сверхпроводящего слоя; б) растяжения сверхпроводящего слоя.

Помимо широко используемого минимального диаметра изгиба, как показателя пригодности ленты, в нашей лаборатории перед проектировкой кабеля проводятся эксперименты по определению минимального шага намотки ленты на формер определенного диаметра. Таким образом, определяется допустимое значение шага, при котором лента сохраняет свой критический ток. Критерий допустимости шага намотки тот же, что и при изгибе – 95% от критического тока недеформированной ленты.

До 2010 года в основном производились ленты 1-го поколения. Именно эта технология была доведена до больших объемов производства ленты такой длины, что позволило создавать длинномерные силовые кабели. Но в

последнее время большинство производителей переключилось на ленты 2-го поколения. Это обусловлено не только прогнозируемыми экономическими преимуществами лент 2-го поколения по сравнению с 1-м, но и тем, что наконец удалось наладить однородность критического тока по длине ленты. Кроме того, критический ток ВТСП лент 2-го поколения значительно вырос и стал сопоставим с критическим током лент 1-го поколения при существенно более высокой плотности тока. При этом, как говорилось в предыдущей главе, их гибкость намного превышает гибкость лент 1-го поколения при существенно более высокой плотности тока. В результате этого появляются новые возможности по созданию более компактных кабелей. Под новые задачи были созданы новые специальные вставки-держатели. Они имеют формеры меньшего диаметра (рис. 2.12).

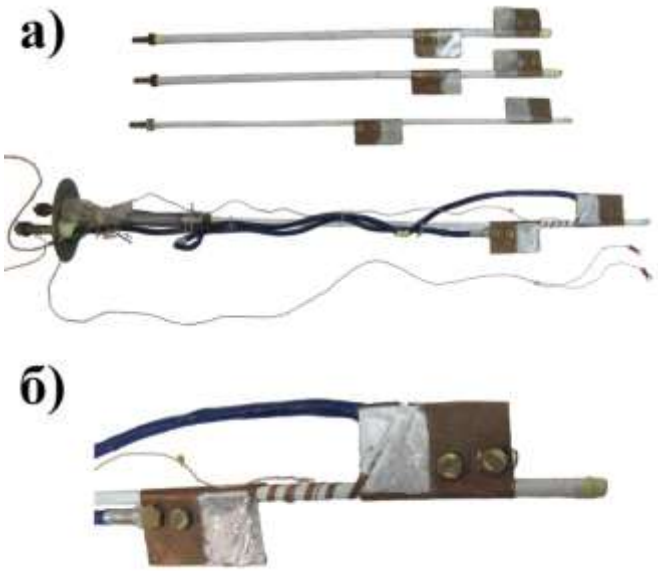



Рис. 2.12. Разработанная в лаборатории специальная вставка-держатель для измерения критического тока намотанной ленты со съемными наконечниками (а) и отдельно наконечник с закрепленной на нем ВТСП лентой (б).

Вследствие того, что на этот эксперимент затрачивается большая длина лент, то проводится он исключительно только перед созданием кабеля. Поэтому результаты будут приведены не для всех лент.

В экспериментах по намотке лент, также как и в экспериментах по определению минимального диаметра изгиба, нужно учитывать сторону у ВТСП лент 2-го поколения вследствие несимметричности структуры.

### 2.3. Исследование анизотропии критического тока ВТСП ленты под воздействием внешнего магнитного поля.

Кроме деформационных воздействий на ленту в устройстве могут влиять и другие факторы. Пропуская большой ток, ленты создают поле, которое влияет на другие ленты в устройстве. Поэтому при проектировании электротехнических устройств необходимо учитывать, как сильно повлияет внешнее магнитное поле, насколько изменит оно критический ток ленты.

Известно, что внешнее магнитное поле уменьшает критический ток сверхпроводящих лент. Кроме того, изменение критического тока зависит не только от величины магнитной индукции поля, но и от направления поля относительно поверхности ленты, при разработке необходимо это учитывать: если в коаксиальном кабеле поле параллельно поверхности ленты, то в соленоиде на краях поле почти перпендикулярно поверхности. Поэтому в нашей лаборатории используются магниты, в которых есть возможность располагать ленту под любым углом относительно направления вектора магнитной индукции.

В нашей лаборатории для исследования влияния внешнего магнитного поля используются два магнита похожей конструкции: медный (до 0.27 Тл) (рис. 2.13а) и высокотемпературный сверхпроводящий (до 0.75 Тл) [6] (рис. 2.13б).

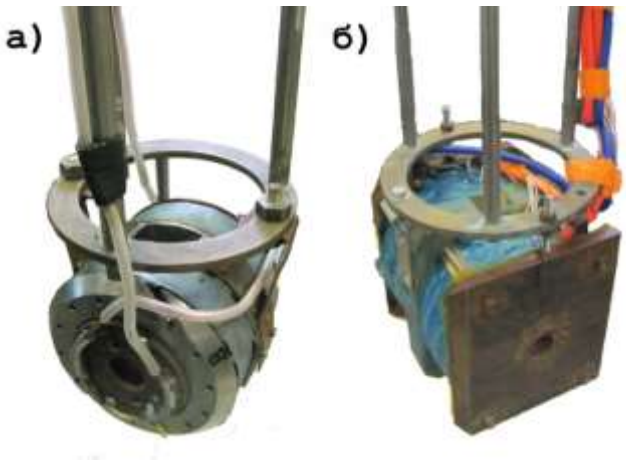



Рис. 2.13. Медный (а) и сверхпроводящий (б) магниты, использующиеся в лаборатории для исследования влияния внешнего магнитного поля на образцы.

Магниты сделаны так, чтобы в них можно было расположить вставку с напаянной сверхпроводящей лентой. Причем, зафиксировать вставку в отверстии магнита можно под любым углом между поверхностью ленты и направлением поля. Измерения критического тока ВТСП ленты, находящейся во внешнем магнитном поле, проводятся на закрепленной в магните вставке с напаянным образцом (рис. 2.14).

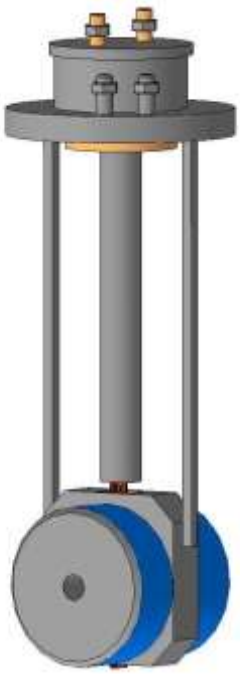


Рис. 2.14. Расположение ВТСП ленты в магните.

Затем магнит вместе со вставкой помещается в криостат (рис. 2.15(3)) с жидким азотом (рис. 2.15(4)). В магнит (рис. 2.15(2)) вводится ток с источника (рис. 2.15(5)), при котором генерируется необходимое для измерений поле. Дальнейшие измерения проводятся по описанной ранее методике в пункте 2.1. Схема собранной измерительной системы приведена на рис. 2.15.

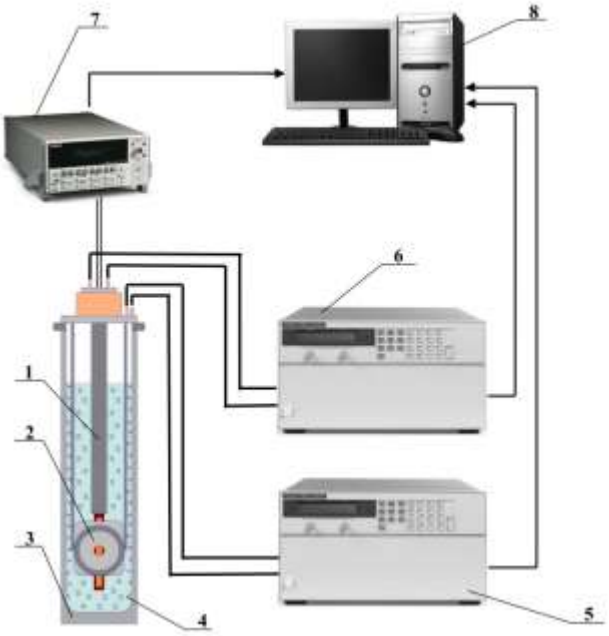



Рис. 2.15. Схема установки измерения критического тока ВТСП ленты, находящейся во внешнем магнитном поле: 1) вставка-держатель с напаянным ВТСП образцом; 2) магнит; 3) криостат; 4) хладагент; 5) источник тока в магните; 6) источник тока в образце; 7) нановольтметр; 8) ПК.

# ГЛАВА 3. ТОКОНЕСУЩИЕ СВОЙСТВА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВТСП ЛЕНТ.

## 3.1. Основные современные производители ВТСП лент.

На сегодняшний день лишь небольшое число компаний способно производить ВТСП ленты с высокими показателями токонесущих способностей, и при этом достаточной длины, чтобы использовать ее в электротехнических устройствах. В данной главе будет представлен анализ однородности критического тока по длине сверхпроводников, влияние изгиба на критический ток, изменение критического тока в зависимости от величины внешнего магнитного поля, и в конце будет проведена оценка перспективы применения ВТСП лент в устройствах. Исследования проводились на ВТСП лентах компаний SuperPower [36], Sumitomo Electric Ind. [37], AMSC [38], SuperOx [3], SuNAM [39]. Из ВТСП лент этих производителей уже были созданы устройства, и они доступны для покупки и их использования.

## 3.2. SuperPower.

Производитель гарантирует более 100 А в 4-мм ленте. На что стоит обратить внимание, так это большой разброс значений в пределах даже одной катушки из поставки. Разница в критическом токе превышает 20 А, и при создании электротехнического устройства не учет данной разницы может привести к тому, что показания на одном участке, где критический ток выше, будут в норме, тогда как более слабый участок перегорит. Поэтому первоочередной задачей исследования было промерить ленты на однородность по всей длине, и убедиться, что они удовлетворяют заявленному условию – критический ток выше 100 А.

Самыми востребованными являются 4-мм ВТСП ленты, которые заявляются компанией SuperPower как ленты для кабелей. За время проведения работы было три крупные поставки ленты: 2007-й год – ВТСП

лента серии 010116C; 2010-й год – ВТСП лента серии SP-1BCS; 2012-й год – ВТСП лента серии M3.

ВТСП лента SP-1BCS-20100811 была разрезана на 19 образцов по 20 см каждый, и был измерен критический ток каждого образца. Наблюдается достаточно большая неоднородность ленты по длине (рис. 3.1). Максимальное расхождение значений составляет 15 А при максимальном значении критического тока 131 А.

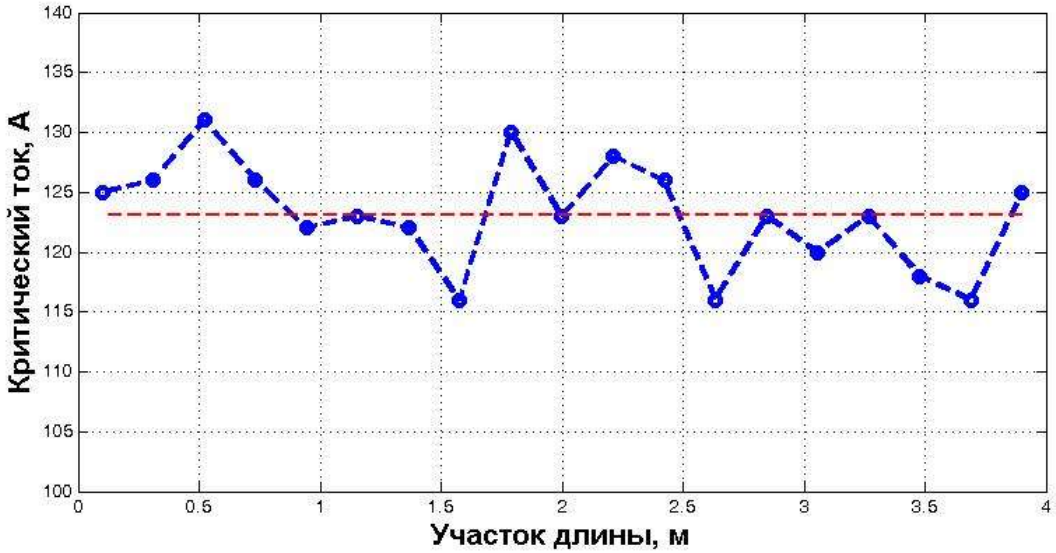



Рис. 3.1. Распределение критического тока ленты SP-1BCS по длине. Синими кружочками обозначены критические токи образцов, красной пунктирной линией усредненное значение критического тока.

Видно, что критический ток на протяжении всей ленты выше отметки в 100 А, а среднее значение критического тока 123,1 А, что не только согласуется с заявленный компанией критерием в 100 А, но и дает запас.

Следующей поставленной в лабораторию лентой компании SuperPower была большая партия с множеством ВТСП лент 2-го поколения серии M3. По этим лентам был проведен ряд измерений для получения статистических данных, которые будут представлены в данной работе.

По лентам двух катушек было проведено исследование неоднородности по длине. Значения критического тока для ленты SPM3-742-2BS по длине представлены графически на рис. 3.2.

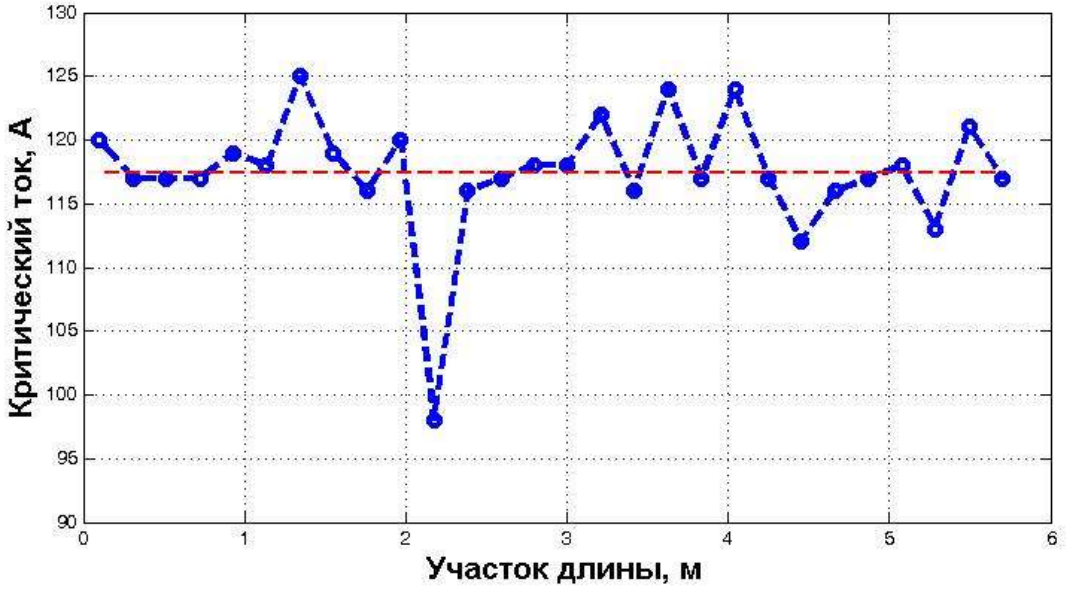



Рис. 3.2. Распределение критического тока ленты SPM3-742-2BS по длине. Синими кружочками обозначены критические токи образцов, красной пунктирной линией усредненное значение критического тока.

Мы видим, что при среднем критическом токе 117,5 А, за исключением одной точки, в которой критический ток 98 А, на протяжении ленты критический ток не ниже 112 А. А расхождение в значении критических токов без учета выпавшей точки 13 А.

Лента SPM3-747-2MS была основной во множестве измерений и экспериментов. Из рис. 3.3, что в отличие от ленты 742-2BS у 747-2MS нет точки, резко выходящей из общего множества. Более того, у всех образцов критический ток был выше 125 А, а порой превышал значение 150 А.

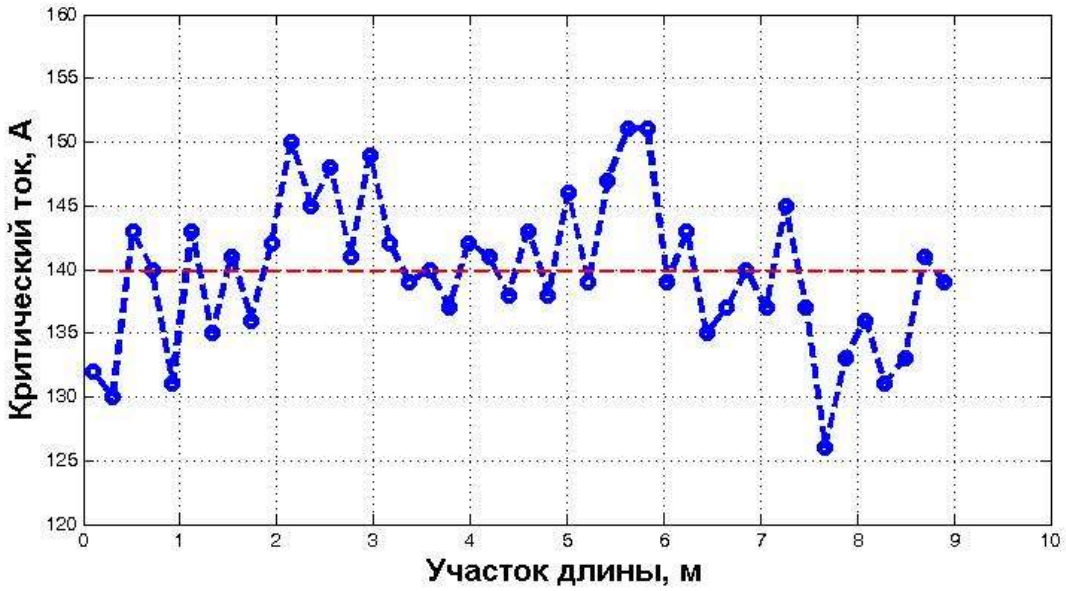



Рис. 3.3. Распределение критического тока ленты SPM3-747-2MS по длине. Синими кружочками обозначены критические токи образцов, красной пунктирной линией усредненное значение критического тока.

При среднем значении критического тока 140,0 А максимальная разница между критическими токами составила 25 А. Но на протяжении всей ленты выполняется заявленное производителем условие, что критический ток 4-мм ленты превышает 100 А.

В табл. 3.1 приведены другие ленты из поставки 4-мм ВТСП лент 2-го поколения компании SuperPower, измерение критических токов также проводилось нами.

Табл. 3.1. Критические токи ВТСП лент 2-го поколения компании SuperPower.

| Наименование ленты | Ic, A | Ic, A паспортные данные |
|---|---|---|
| SP M3-905-3 MS | 121 | 120 |
| SP M3-906-2 FS | 115 | 122 |
| SP M3-907-2 BS | 106 | 107 |
| SP M3-725-2 FS | 124 | 123 |
| SP M3-763-4 MS | 123 | 113 |

| | | |
|---|---|---|
| SP M3-742-2 BS | 118 | 116 |
| SP M3-747-2 MS | 139 | 136 |
| SP M3-933-10 BS | 135 | 129 |
| SP M3-933-9 BS | 121 | 119 |
| SP M3-933-6 FS | 137 | 142 |
| SP M3-919-3 BS | 107 | 90 |

Как видим, у всех лент критический ток выше 100 А (даже у 919-3BS, у которой производители заявили критический ток 90 А). Можно сделать вывод, что используя 4-мм, с большой долей вероятности можно верить производителю, и доверять паспортным данным при проектировании электротехнического устройства на основе данных лент.

Ленты SuperPower являются ВТСП лентами 2-го поколения. Поэтому для них приводятся два значения на каждый диаметр изгиба: сжатие, и растяжение сверхпроводящего слоя. Производитель заявляет, что допустимый минимальный диаметр изгиба их ленты в обоих случаях – 11 мм. Как видно из рис. 3.4-5, на сжатие сверхпроводящего слоя заявление производителей подтверждается. Тогда как при растяжении не всегда ленте удается сохранить критический ток в пределах 95%. Стабильно критический ток выше 95% от недеформированного только при диаметре изгиба 16 мм. Что следует учитывать в случае разработки устройства на основе ленты SuperPower.

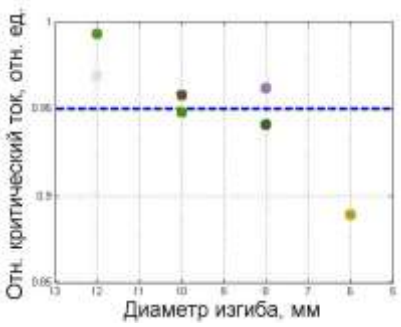



Рис. 3.4. Относительный критический ток ВТСП ленты 2-го поколения SuperPower до и после деформации при сжатии сверхпроводящего слоя.

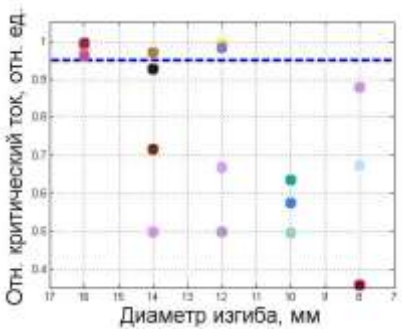



Рис. 3.5. Относительный критический ток ВТСП ленты 2-го поколения SuperPower до и после деформации при растяжении сверхпроводящего слоя.

ВТСП ленты 2-го поколения, предположительно, должны быть намного более гибкими, чем ВТСП ленты 1-го поколения. Поэтому для измерения шага намотки этих лент были созданы новые тонкие вставки-держатели, позволяющие оценить возможность применения ВТСП ленты на диаметрах формера вплоть до 8 мм. Измерения шага намотки проводились на ленте М3-742-2BS (рис. 3.6-3.7).

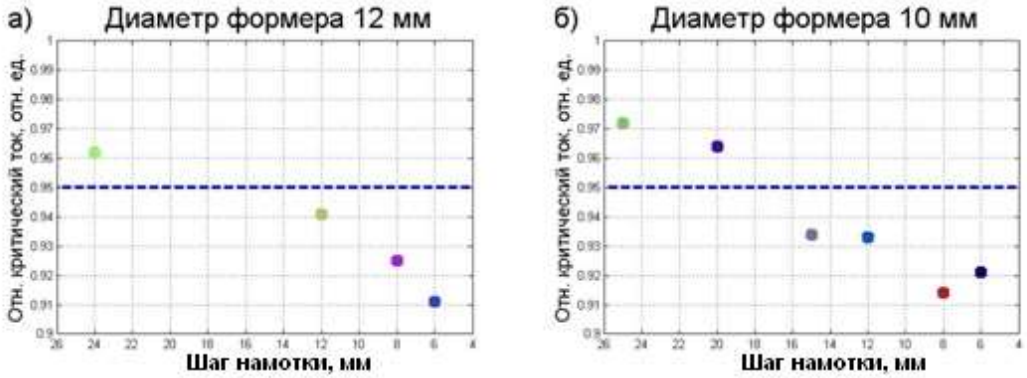



Рис. 3.6. Относительный критический ток ВТСП ленты 2-го поколения SPM3-742-2BS до и после намотки на формер при сжатии сверхпроводящего слоя для случаев: а) диаметр формера 12 мм; б) диаметр формера 10 мм.

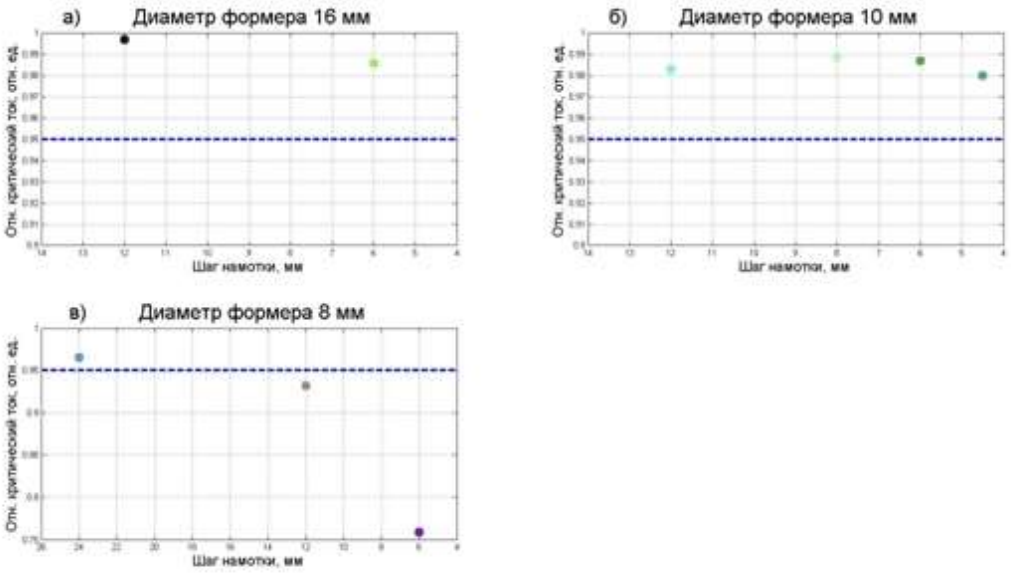



Рис. 3.7. Абсолютный и относительный критический ток ВТСП ленты 2-го поколения SPM3-742-2BS до и после намотки на формер при растяжении сверхпроводящего слоя для случаев: а) диаметр формера 16 мм; б) диаметр формера 10 мм; в) диаметр формера 8 мм.

При растяжении сверхпроводящего слоя шаг намотки меньше, чем при сжатии. Это хорошо видно на формере диаметром 10 мм, где при сжатии критическим шагом является 20 мм, а при растяжении даже при шаге 4,5 мм критический ток значительно превышает критерий 0,95.

Полученные данные не соответствуют предполагаемому поведению ВТСП лент 2-го поколения при намотке, и этот же эксперимент на растяжение сверхпроводящего слоя был проведен на еще одной ленте из партии – на М3-747-2MS (рис. 3.8).

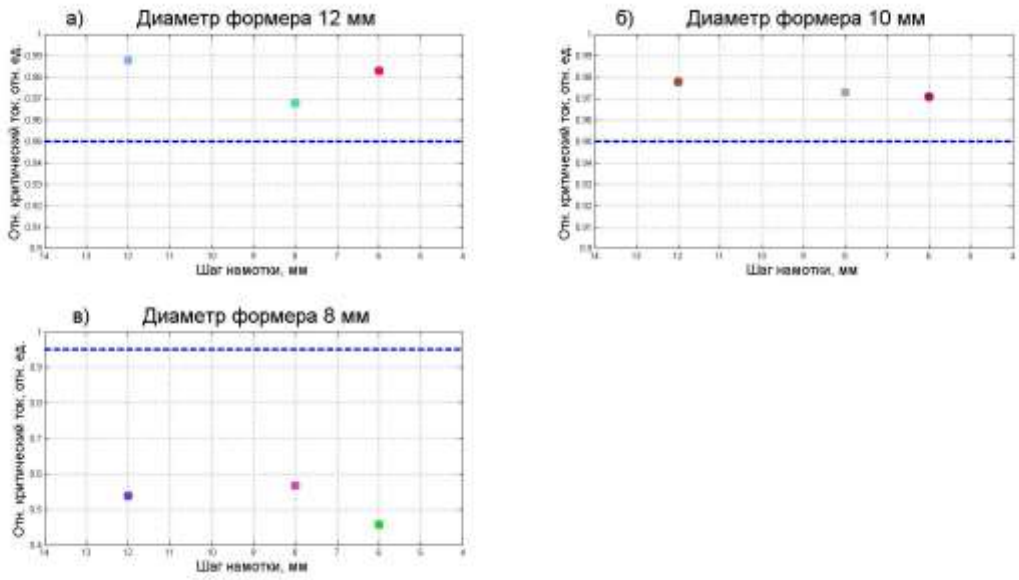



Рис. 3.8. Абсолютный и относительный критический ток ВТСП ленты 2-го поколения SPM3-747-2MS до и после намотки на формер при растяжении сверхпроводящего слоя для случаев: а) диаметр формера 16 мм; б) диаметр формера 10 мм; в) диаметр формера 8 мм.

Как видно, для формеров диаметрами 10 и 12 мм все повторилось, а на формере диаметром 8 мм критический ток был значительно ниже критического тока недеформированной ленты.

Во внешнем магнитном поле ленты SuperPower ведут себя по классической модели, соответствующей ВТСП лентам 2-го поколения.

Первой лентой компании SuperPower, остатки которой до сих пор используются для сравнения и экспериментов над ВТСП лентой 2-го поколения, является 070716-1С. Критический ток данной 4-мм ленты ниже 100 А, а поведение во внешнем магнитном поле представлено на рис. 3.9.

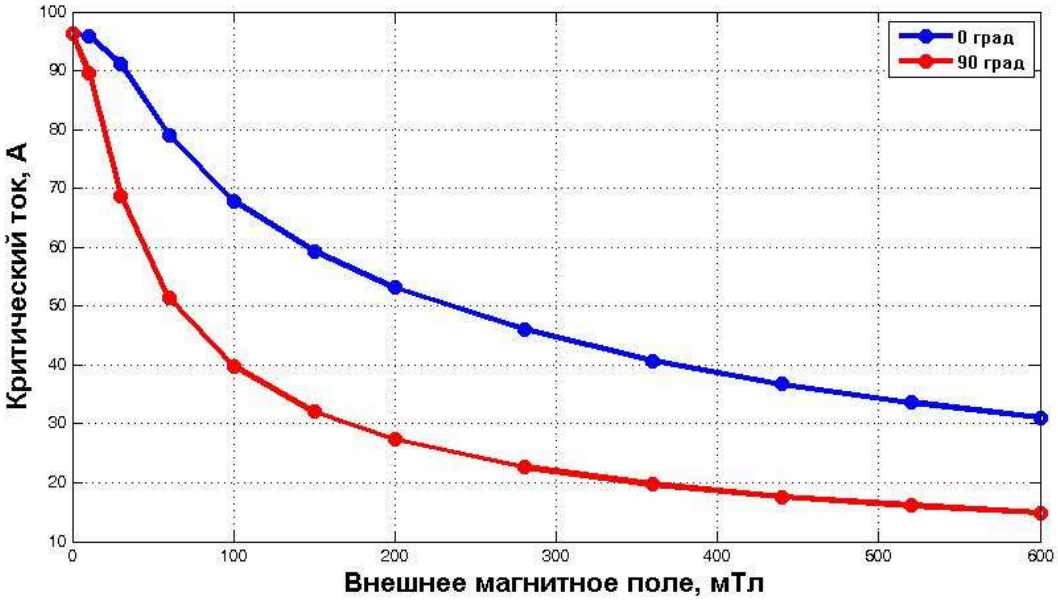



Рис. 3.9. Зависимость критического тока ленты SP 070716-1C от внешнего магнита поля при разном направлении поля относительно поверхности ленты.

Лента 1BCS имеет значительно больший критический ток, и была заявлена производителем как армированная. Производителю было интересно поведение этой ВТСП ленты во внешнем магнитном поле при различных углах. Как видно из рис. 3.10, поведение вполне типичное для ВТСП лент 2-го поколения, и никаких особенностей замечено не было.

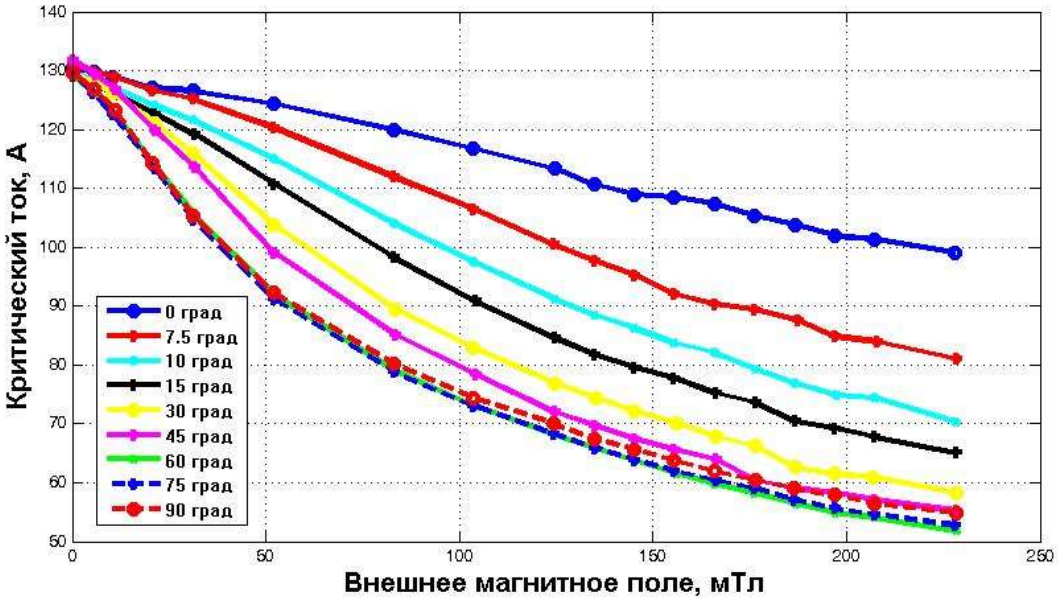



Рис. 3.10. Зависимость критического тока ленты SP 1BCS от внешнего магнита поля при разном направлении поля относительно поверхности ленты.

Особый интерес представляют широкие ВСТП ленты, рассматриваемые в основном для трансформаторов, соленоидов, токоограничителей. Для этих ВТСП лент в силу своего предназначения по применению крайне важно схожее поведение критического тока от внешнего магнитного поля при всех углах. Однако образец SP 942-2BS, имеющий невысокое значение критического тока для 12-мм ленты, уже при 200 мТл имеет разброс критического тока более чем 50 А в параллельном и перпендикулярном полях (рис. 3.11).

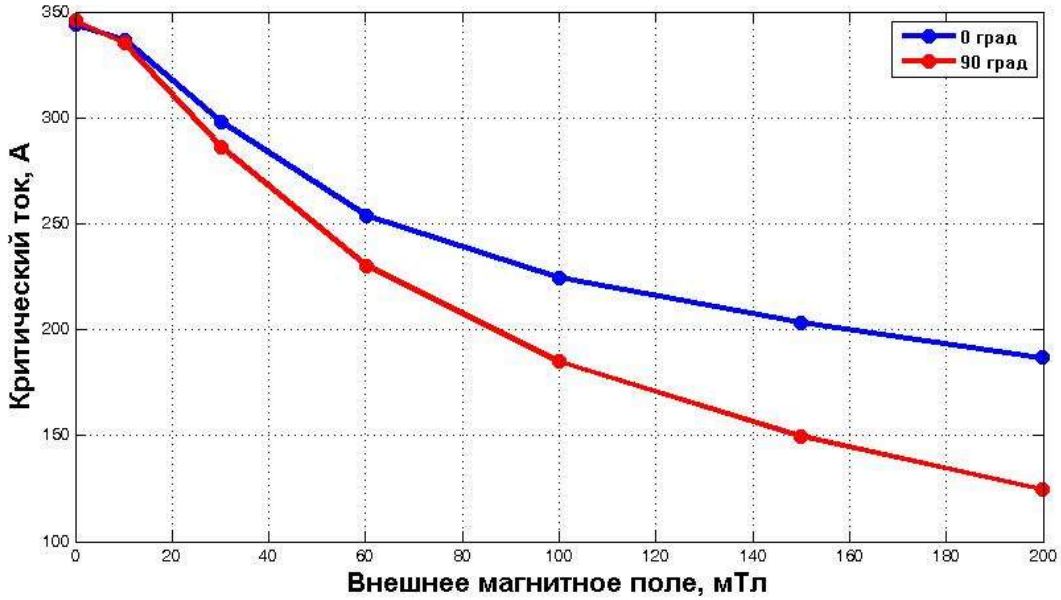



Рис. 3.11. Зависимость критического тока 12-мм ленты SP 942-2BS от внешнего магнита поля при разном направлении поля относительно поверхности ленты.

В целом, ленты SuperPower, производимые в больших масштабах, соответствуют заявленным производителем характеристикам, представленным в табл. 3.1, однако прослеживается неоднородность образцов по длине.

### 3.3. American Superconductors.

Начиная с 2003 года, в нашу лабораторию было поставлено множество ВТСП лент компании AMSC. Их особенностью было разнообразие материалов, применяемых производителем. Компания American Superconductors поставляла ленты 1-го и 2-го поколения, с различными вариациями покрытий и подложек, с рекордными для своего времени показателями.

В 2014 году были проведены измерения токонесущих характеристик 12-мм ВТСП лент 2-го поколения компании American Superconductors. Целью измерений было оценить критические токи в каждой из поставленных кассет, и соответствуют ли они заданным критериям. Результаты измерения критического тока ВТСП лент AMSC представлены в табл. 3.2.

Табл. 3.2. Критический ток 12-мм ВТСП лент компании AMSC.

| Номер кассеты | Маркировка ленты | Критический ток, А |
|---|---|---|
| 1 | 618A-2-280-483 | 311,3 |
| 2 | 650A1-1-51-282 | 284,7 |
| 3 | 652A-2-1-148 | 297,3 |
| 4 | 654B-1-64-182 | 300,8 |
| 5 | 680A-1-1-290 | 298,8 |
| 6 | 680A-1A-1-193 | 280,8 |
| 7 | 683A1-1-78-212 | 305,9 |
| 8 | 686B1-4-5-145 | 296,9 |
| 9 | 656B-1-29-575 | 305,2 |

Данная лента рассматривалась для создания трансформатора. Поэтому помимо измерения критического тока исходной ленты, необходимо было просмотреть поведение ВТСП ленты во внешнем магнитном поле, как параллельном, так и перпендикулярном. Измерения проводились в полях до 600 мТл, при двух краевых положениях ленты относительно внешнего магнитного поля: 0 градусов и 90 градусов (рис. 3.12).

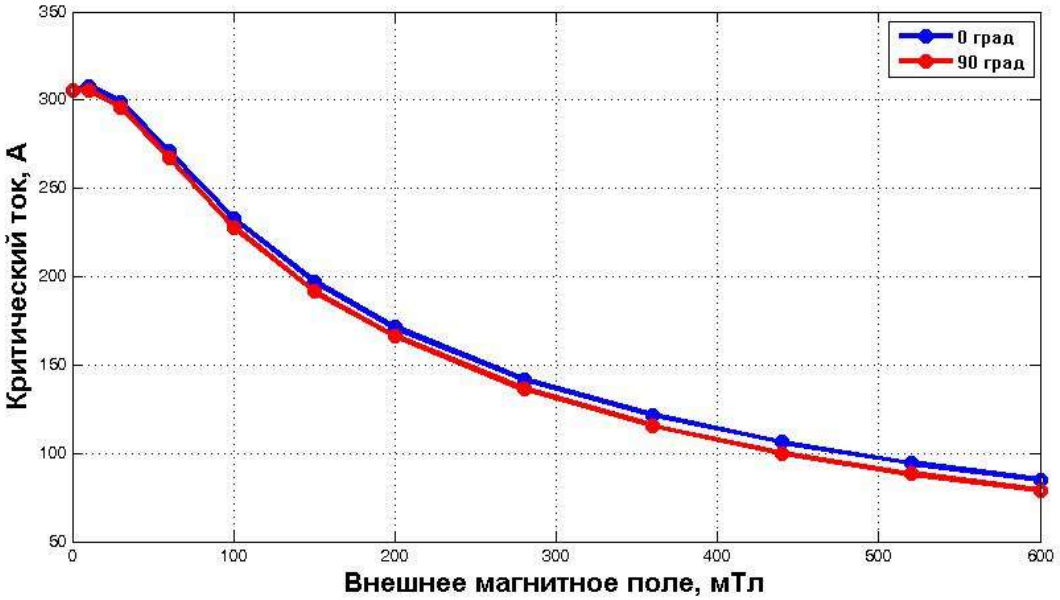



Рис. 3.12. Зависимость критического тока 12-мм ВТСП ленты 2-го поколения компании AMSC 656B-1-29-575.

У 12-мм ВТСП ленты AMSC наблюдается наименьший разброс значений критического тока при параллельном и перпендикулярном направлениях магнитного поля из всех исследованных образцов. При небольшом критическом токе этой ленты, поведение ее критического тока во внешнем поле отвечает требованиям однородности для всех углов, и она является наилучшим образцом для применения в устройствах, где направление поля различно. Хочется отметить, что разработки изотропных ВТСП лент 2-го поколения ведутся давно, и данная лента является прямым подтверждением успешности развития данного направления.

### 3.4. Sumitomo Electric Industries, Ltd.

Компания Sumitomo Electric Industries в настоящее время остается чуть ли не единственным производителем ВТСП лент первого поколения, и их ленты отличаются стабильностью. Разброс критического тока по длине минимальный (порядка 5 А на фоне критического тока 180 А). Заявленный критический ток полностью подтверждается.

В табл. 3.3 приведены значения критического тока для различных ВТСП лент компании Sumitomo 1-го поколения.

Табл. 3.3. Критический ток ВТСП лент 1-го поколения компании Sumitomo.

| Марка | Критический ток, А |
|---|---|
| SS-1 | 184,2 |
| SS-2 | 180,4 |
| SS-3 | 182,9 |
| SS-4 | 185,4 |
| SS-5 | 185,2 |
| SS-6 | 186,7 |
| SS-7 | 188,1 |
| SS-8 | 185,0 |
| SS-9 | 184,0 |

| Марка | Критический ток, А |
|---|---|
| CA-1 | 186,5 |
| CA-2 | 187,0 |
| CA-3 | 185,2 |
| CA-4 | 182,9 |
| CA-5 | 186,0 |
| CA-6 | 188,1 |
| CA-7 | 187,3 |
| CA-8 | 188,9 |
| CA-9 | 189,8 |
| CA-10 | 193,6 |

| Марка | Критический ток, А |
|---|---|
| H-1 | 107,0 |
| H-2 | 144,4 |
| H-3 | 180,1 |
| H-4 | 177,9 |
| H-5 | 183,2 |
| H-6 | 183,4 |
| H-7 | 101,8 |

Как видим, за небольшим исключением критический ток отличается не больше чем на 5 А.

Что же касается лент 2-го поколения, то разброс значений более существенен. Кроме того, некоторые ленты обладают низким критическим током для современных образцов. В табл. 3.4 представлены результаты по измерению критического тока ВТСП лент 2-го поколения компании Sumitomo.

Табл. 3.4. Критический ток ВТСП лент 2-го поколения компании Sumitomo.

| Марка | Критический ток, А |
|---|---|
| 2G1-1 | 91,1 |

| Марка | Критический ток, А |
|---|---|
| 2G2-1 | 101,8 |

| Марка | Критический ток, А |
|---|---|
| 2G3-1 | 54,1 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2G1-2 | 88,1 | 2G2-2 | 108,7 | 2G3-2 | 56,6 |
| 2G1-3 | 93,9 | 2G2-3 | 96,6 | 2G3-3 | 43,4 |
| 2G1-4 | 90.3 | 2G2-4 | 101.9 | 2G3-4 | 46.1 |
| 2G1-5 | 80.1 | 2G2-5 | 102.6 | 2G3-5 | 51.5 |
| 2G1-6 | 90.6 | 2G2-6 | 102.1 | 2G3-6 | 49.4 |
| 2G1-7 | 95.0 | 2G2-7 | 101.6 | 2G3-7 | 49.1 |
| 2G1-8 | 89.2 | 2G2-8 | 99.7 | 2G3-8 | 58.5 |
| | | 2G2-9 | 98.6 | 2G3-9 | 50.8 |

Как видно, ленты неоднородны. Разница в значении критического тока между разными типами лент 2-го поколения более 50 А. При этом ленты еще и неоднородны по длине. В первую очередь, это объясняется тем, что Sumitomo в области ВТСП лент 2-го поколения ведет исследовательскую работу, и их ленты еще не поставляются в продажу.

Большим плюсом лент 2-го поколения является их гибкость. Что и подтверждается при сравнении с лентой Sumitomo 1-го поколения. Если у ленты SuperPower минимальный диаметр изгиба 16 мм (который фактически получили в нашей лаборатории), то минимальный диаметр ленты Sumitomo – 60 мм. Разница более чем существенная. Хотя при создании кабеля оба диаметра являются приемлемыми.

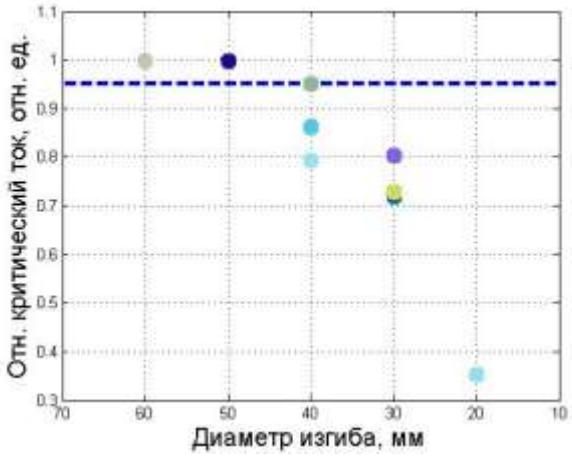



Рис. 3.13. Относительный критический ток ВТСП ленты 1-го поколения SCA09-2008-038-024 компании Sumitomo после изгиба.

Минимальный диаметр изгиба ленты SCA09-2008-038-024 составляет 40 мм, и это минимальный диаметр изгиба из всех ВТСП лент 1-го поколения компании Sumitomo Electric Industries, Ltd.

Компания Sumitomo производит ленту, которая может считаться эталоном ВТСП лент 1-го поколения. Кроме высокого и однородного по длине критического тока, эта лента имеет характерные для лент 1-го поколения гладкую зависимость от внешнего параллельного поля и резкий спад от перпендикулярного поля. Стоит отметить, что в случае коаксиального кабеля, когда поле параллельно поверхности, лента Sumitomo показывает лучшие результаты (рис. 3.14).

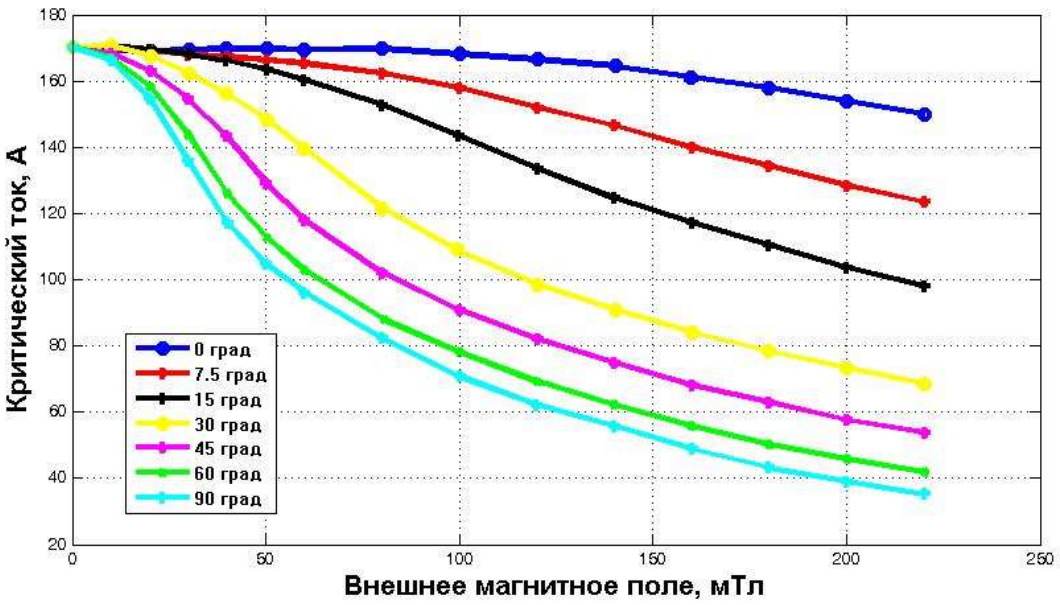



Рис. 3.14. Зависимость критического тока ленты ВТСП ленты 1-го поколения компании SumitomoSCA09-2008-038-026 от внешнего магнита поля при разном направлении поля относительно поверхности ленты.

Как говорилось выше, у ВТСП лент 1-го поколения влияние параллельного внешнего поля гораздо ниже, чем у лент 2-го поколения. На рис. 3.14 видно, что почти до поля 100 мТл критический ток в параллельном поле (0 град) практически не меняется. Это свойство хорошо характеризует ленту SCA09-2008-038-026 как материал при конструировании кабеля, так

как в силовых кабелях магнитное поле оценивается как параллельное в пределах 50 мТл.

### 3.5. SuperOx.

На примере ВТСП лент российской компании SuperOx наблюдаем стадии совершенствования свойств сверхпроводников. Видно, как улучшается критический ток, как ленты становятся надежнее, менее перегорающими, и однородней по длине. На сегодняшний день критический ток лент SuperOx практически сравнялся с критическим током лент компании SuperPower. И масштабы производства этой ленты также нарастают.

Наглядно увеличение критического тока в 4-мм лентах можно оценить по данным, представленным в табл. 3.5. От образцов с критическим током порядка 40 А компания SuperOx перешла на ленту с критическим током 150 А буквально за один год. Такими показателями не может похвастать ни один другой производитель.

Табл. 3.5. Критический ток ВТСП лент 2-го поколения компании SuperOx.

| Дата поставки | Марка | Критический ток, А |
|---|---|---|
| 6.2012 | BY-133 | 96,3 |
| | BY-126 | 39,2 |
| | | 38,8 |
| | | 47,6 |
| | | 49,3 |
| 10.2012 | SNJ-001R | 88,0 |
| | | 100,7 |
| 10.2013 | | 108,6 |
| | | 105,8 |
| | | 111,0 |

| | | |
|---|---|---|
| | | 109,9 |
| 10.2013 | SuperOx.2 | 154,5 |
| | | 148,8 |
| | | 160,1 |
| | | 155,8 |

У компании SuperOx величина критического тока 4-мм ленты превышает критический ток аналогичной ленты SuperPower, измерявшейся в нашей лаборатории.

Широкие ленты SuperOx пока не обладают конкурентоспособными характеристиками. Критический ток варьируется от 180 А до 240 А. Что значительно меньше, чем у лент компаний SuperPower и AMSC.

Лента SuperOx имеет наименьший диаметр изгиба на сжатие сверхпроводящего слоя (8 мм), и 16 мм при его растяжении – параметры, которые находятся на уровне других, более опытных компаний.

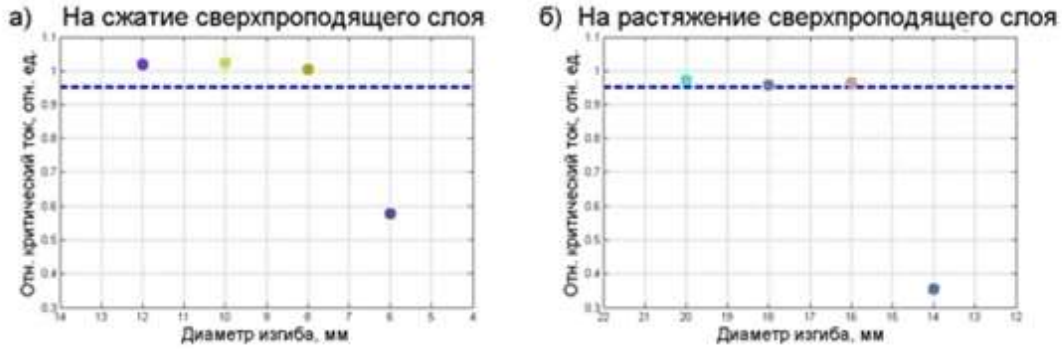



Рис. 3.15. Относительный критический ток ВТСП ленты 2-го поколения SuperOx до и после деформации при: а) сжатии сверхпроводящего слоя; б) растяжении сверхпроводящего слоя.

Ленты SuperOx во внешнем магнитном поле имеют те же характеристики, что и ленты SuperPower. Образцов этого производителя было промерено не так много, чтобы прослеживать тенденции.

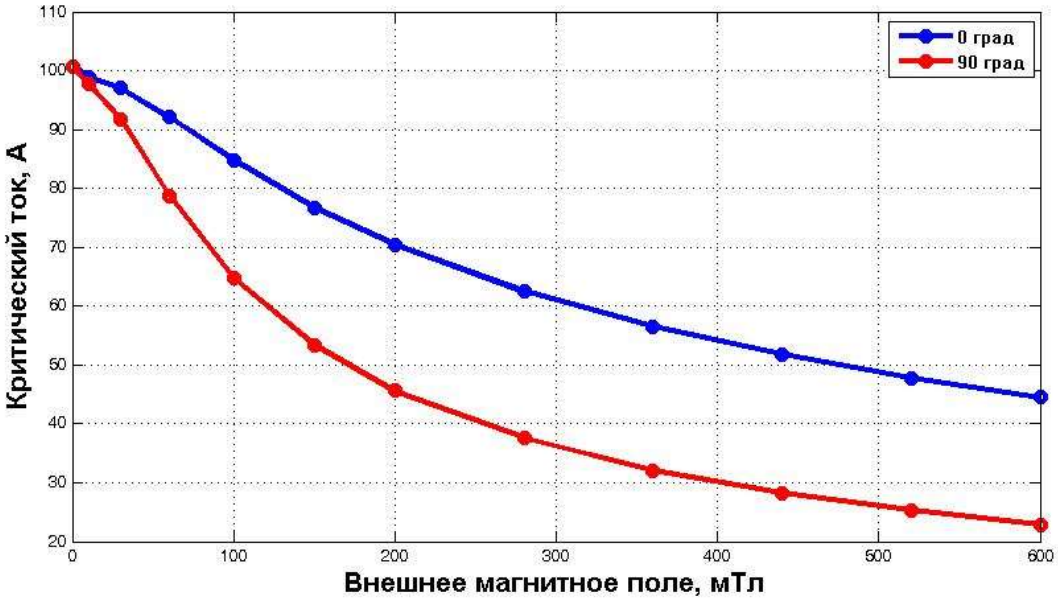



Рис. 3.16. Зависимость критического тока ленты SOJ-001R от внешнего магнита поля при разном направлении поля относительно поверхности ленты.

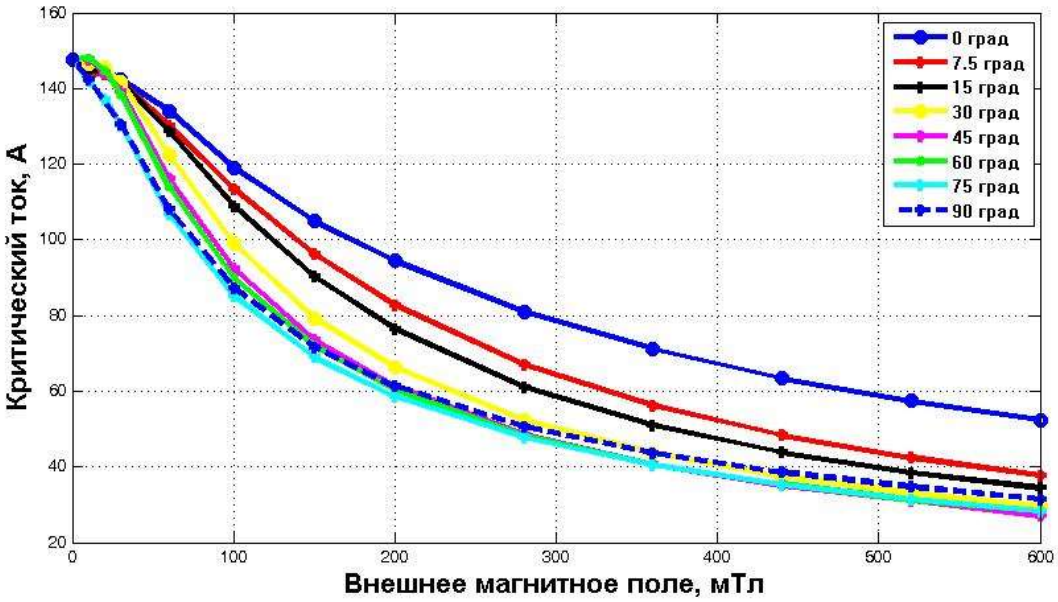



Рис. 3.17. Зависимость критического тока ленты SuperOx.2 от внешнего магнита поля при разном направлении поля относительно поверхности ленты.

У ленты SuperOx видна характерная для лент 2-го поколения небольшая разница между токами в параллельном и перпендикулярном магнитном полях, и так же как и у ленты SP 1BCS смещенный минимум (который приходится не на перпендикулярное поле). В параллельном поле критический ток при 30 мТл падает более чем на 5 А. Но все равно значение

падения выше 95% от критического тока ленты без внешнего воздействия. Поэтому использование в кабелях этой ленты расценивается как вполне приемлемое.

### 3.6. SuNAM.

И последний исследованный производитель – корейская компания SuNAM. Они являются абсолютным лидером по критическому току в 4-мм ВТСП лентах 2-го поколения. В некоторых образцах критический ток превышает рекордную отметку в 200 А.

В июле 2013-го года в нашу лабораторию были поставлены 4 кассеты с небольшими длинами 4-мм ленты SuNAM. По всем кассетам были проведены измерения, и критические токи лент в кассетах приведены в табл. 3.6.

Табл. 3.6. Критические токи ВТСП ленты 2-го поколения компании SuNAM.

| Кассета | Ic, A | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A | 200,1 | 200,3 | 194,8 | 185,7 | 190,8 | |
| B | 193,2 | 195,8 | 193,4 | 193,4 | 186,6 | 188,2 |
| C | 175,8 | 180,1 | 180,0 | | | |
| D | 201,0 | 198,2 | 199,5 | 192,5 | 193,0 | |

Из общей статистики выпадает только лента кассеты C. Рекордный же ток был зафиксирован в образце из кассеты D. В целом, видно, что критический ток лент SuNAM - наибольший из всех ВТСП лент 2-го поколения. Разброс же критического тока по длине в каждой кассете такой же, как и у других производителей (достигает 15 А).

У лент SuNAM: минимальный диаметр составляет 12 мм как на сжатие, так и растяжение. Но стоит отметить, что разница критических токов у всех ВТСП лент 2-го поколения не велика. Все они обладают хорошей гибкостью.

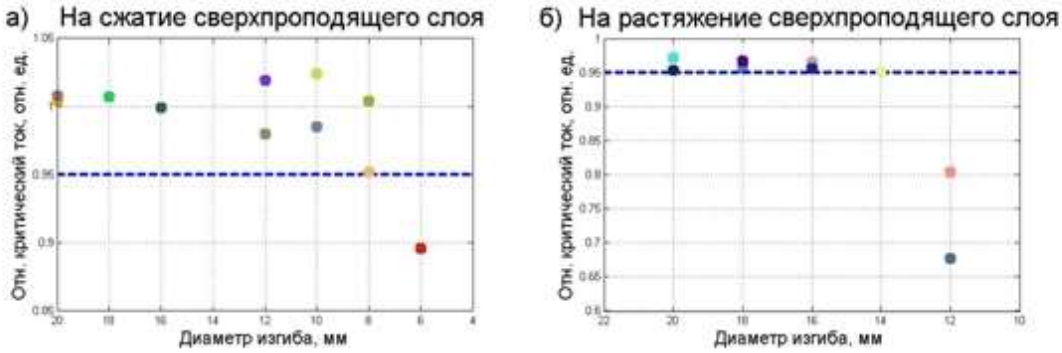



Рис. 3.18. Относительный критический ток ВТСП ленты 2-го поколения SuNAM до и после деформации при: а) сжатии сверхпроводящего слоя; б) растяжении сверхпроводящего слоя.

На рис. 3.18 мы видим, что лента SuNAM помимо большого критического тока для 4-мм ВТСП лент обладает также и хорошими механическими свойствами. Если при растяжении минимальный диаметр изгиба равен 14 мм (при этом уже при 20 мм ток близок к пограничному условию - 0,95 от критического тока недеформированной ленты), то при сжатии минимальный диаметр изгиба – всего 8 мм. Это наименьший диаметр изгиба из всех измеренных образцов наряду с лентами SuperOx.

Лента SuNAM имеет самую гладкую зависимость значения критического тока от внешнего магнитного поля из всех исследованных лент (рис. 3.19). Наименьшее расхождение между параллельным и перпендикулярным полем.

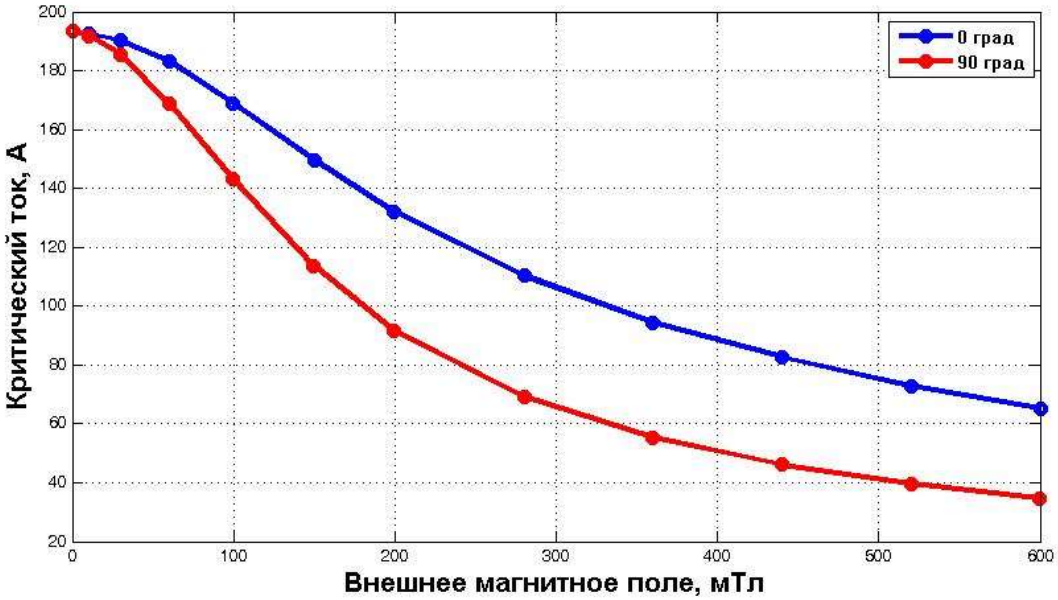



Рис. 3.19. Зависимость критического тока ленты SuNAM от внешнего магнита поля при разном направлении поля относительно поверхности ленты.

В ленте SuNAM наблюдается классическое поведение критического тока лент 2-го поколения во внешнем магнитном поле.

### 3.7. Сравнение результатов и оценка возможности применения.

В нашей лаборатории были промерены множество различных лент. Мы имеем образцы самых крупных производителей, на основе которых делаются электротехнические устройства по всему миру. На основе проведенных измерений составлена большая таблица со значениями критических токов производимых за последние годы ВТСП лент (табл. 3.6).

Табл. 3.6. Критические токи исследованных в ходе данной работы образцов.

| Производитель | Марка | Поколение | Год | Ширина, мм | Критический ток, А |
|---|---|---|---|---|---|
| SuperPower | 070716-1C | 2G | 2007 | 4 | 90 ─ 100 |
| | 1BCS | 2G | 2010 | 4 | 116 ─ 131 |
| | M3-742-2BS | 2G | 2011 | 4 | 98 ─ 125 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | М3-747-2MS | 2G | 2011 | 4 | 126 ─ 151 |
| | — | 2G | 2011 | 4 | 90 ─ 139 |
| | М3 942-2 | 2G | 2011 | 12 | 346 ─ 375 |
| Sumitomo | SS | 1G | 2012 | 4 | 180 ─ 188 |
| | CA | 1G | 2012 | 4 | 183 ─ 194 |
| | H | 1G | 2012 | 4 | 102 ─ 183 |
| | 2G1 | 2G | 2012 | 4 | 80 ─ 95 |
| | 2G2 | 2G | 2012 | 4 | 97 ─ 109 |
| | 2G3 | 2G | 2012 | 4 | 43 ─ 59 |
| SuperOx | BY-133 | 2G | 2012 | 4 | 96 |
| | BY-126 | 2G | 2012 | 4 | 39 ─ 49 |
| | SNJ-001R | 2G | 2012 | 4 | 88 ─ 107 |
| | SuperOx.2 | 2G | 2012 | 4 | 106 ─ 111 |
| | | | | | 149 ─ 160 |
| SuNAM | — | 2G | 2012 | 4 | 176 ─ 201 |
| AMSC | 344B | 2G | 2007 | 4 | 82 ─ 90 |
| | 656B | 2G | 2013 | 12 | |

Из таблицы видно, что наибольший критический ток из 4-мм лент имеют ленты SuNAM и Sumitomo (2-е и 1-е поколение соответственно). При этом замечено, что в последних партиях 4-мм ВТСП лент 2-го поколения компаний SuperPower и SuperOx критический ток стабильно выше 100 А, что является хорошим показателем для данного типа лент.

Если рассматривать сохранение токонесущей способности после изгиба, то очевидно, что у ленты 1-го поколения худшие показатели (табл. 3.7). Относительно же всех лент 2-го поколения, минимальный диаметр лент сопоставим: 8-12 мм на сжатие сверхпроводящего слоя, и 12-16 мм – на растяжение.

Табл. 3.7. Минимальный диаметр изгиба исследованных ВТСП лент.

| Наименование | Критический ток, А | Минимальный диаметр изгиба, мм | |
|---|---|---|---|
| | | Сжатие СП слоя | Растяжение СП слоя |
| SuperPower M3-742-2BS | 98 - 125 | 12 | 16 |
| Sumitomo SCA09-2008-038-026 | 170 - 180 | 50 | |
| SuperOx.2 | 106-111, 149-160 | 8 | 16 |
| SuNAM | 176 - 201 | 12 | 14 |

Влияние внешнего магнитного поля на ВТСП ленты в общем отвечает моделям. Как видно на рис. 3.20, самая плавная зависимость от параллельного магнитного поля и резкое спадание критического тока в перпендикулярном поле наблюдается у ВТСП ленты 1-го поколения (SCA09-2008-038-026), (рис. 3.21). Но стоит отметить, что при использовании в кабеле (параллельное поле до 50 мТл) практически у всех лент отмечено малое спадание значения критического тока. Самый высокий критический ток имеет лента 2-го поколения компании SuNAM. Именно она показывает наивысший критический ток в параллельном магнитном поле. Что касается перпендикулярного магнитного поля, то уже при значении 100 мТл лента 1-го поколения Sumitomo уступает в величине критического тока большинству лент 2-го поколения, что характеризует эту ленту как неудачный материал для создания, в частности, соленоидов.

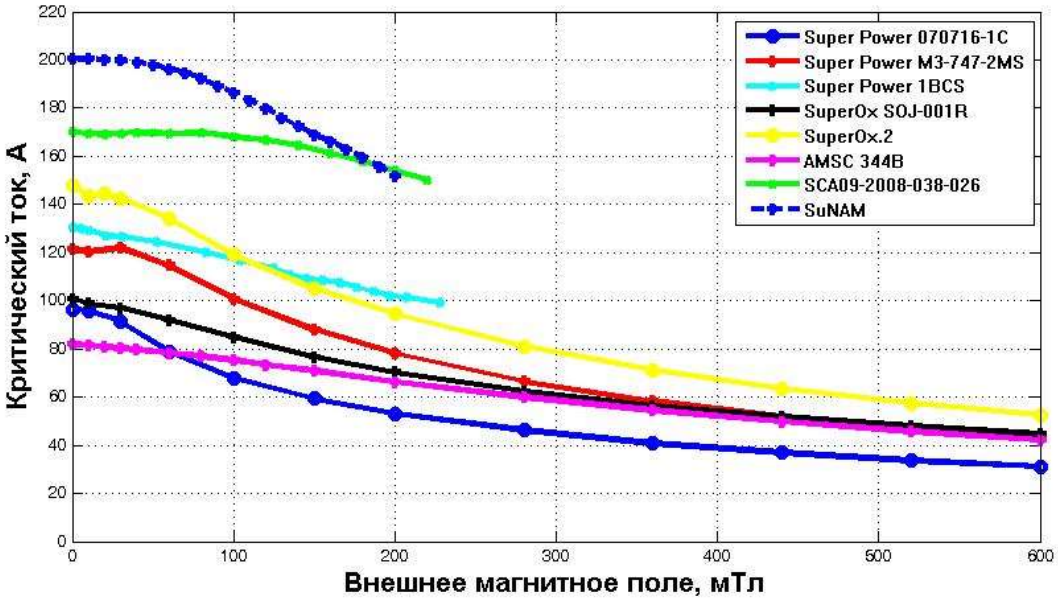



Рис. 3.20. Зависимость критического тока ВТСП лент от параллельного магнитного поля.

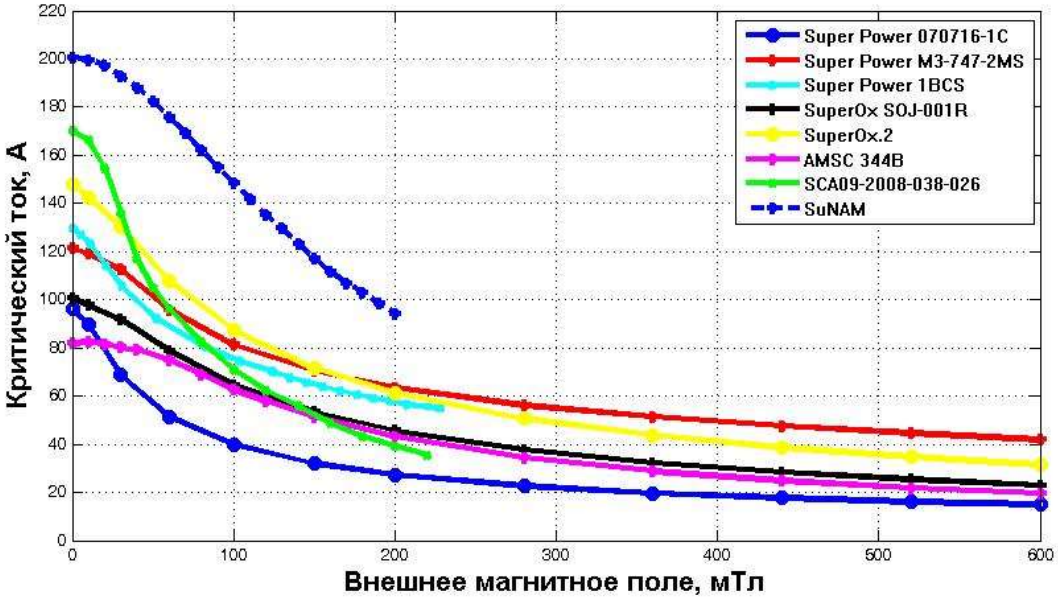



Рис. 3.21. Зависимость критического тока ВТСП лент от перпендикулярного магнитного поля.

Из полученных нами результатов, можно сделать вывод, что все ленты подходят для использования в силовых кабелях, так как до 50 мТл параллельного магнитного поля, характерного силовым кабелям, критический ток всех лент не падает. Но при этом, влияние изгиба накладывает большие ограничения на использование. ВТСП ленты 1-го

поколения не могут быть использованы в кабелях типа CORC и на формерах маленького диаметра, а при использовании ВТСП лент 2-го поколения нужно следить за тем, какой стороной проводится укладка в кабеле. Кроме того, значительная разница в диаметрах изгиба на сжатие и растяжение у ВТСП лент 2-го поколения накладывает ограничения на применение соединения лент внахлест, так как критический ток разных участков лент может сильно отличаться. В сильных магнитных полях наиболее однородно себя ведет ВТСП лента 2-го поколения компании SuperPower серии М3, которая не имеет зависимости от направления внешнего магнитного поля, что является важным условиям при создании соленоидов на переменном токе. В параллельном же магнитном поле наибольшее значение критического тока у ВТСП лент 2-го поколения SuperOx.2, что может быть использовано при создании токовводов. ВТСП лента SuNAM имеет наибольший критический ток, и хорошие показатели гибкости, поэтому она является наилучшим материалом при создании мелкоразмерных силовых кабелей. Sumitomo производит однородную ВТСП ленту 1-го поколения, с высоким критическим током, без изменения критического тока в параллельном поле вплоть до 60 мТл, но обладающую низкой гибкостью по сравнению с ВТСП лентами 2-го поколения, но это все же оставляет предпочтение для применения лент Sumitomo в силовых кабелях классической архитектуры. На основе оценки полученных результатов для ВТСП лент составлена таблица 3.8, в которой представлены основные токонесущие свойства исследованных образцов и рекомендовано применение той или иной ленты для определенных электротехнических устройств.

Табл. 3.8. Рекомендации на основе сравнительного анализа по применению исследованных ВТСП лент в реальных электротехнических устройствах.

| Наименование производителя ВТСП ленты | Крит. ток, А | Мин. диаметр изгиба, мм | Отн. крит. ток при 50 мТл ∥ внешнего поля | Отн. крит. ток при 200 мТл ⊥ внешнего поля | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| SuperPower | до 150 | 12(сж)-16(раст) | 0,98 | 0,54 | Соленоиды, триаксиальный кабель |
| Sumitomo | до 194 | 50 | 1,00 | 0,48 | Коаксиальный, триаксиальный кабели |
| SuperOx | до 160 | 8(сж)-16(раст) | 0,95 | 0,40 | Токовводы, кабель типа CORC, мотор |
| SuNAM | до 201 | 12(сж)-14(раст) | 0,98 | 0,48 | Скрученный кабель, триаксиальный кабель |
| AMSC | до 90 | — | 0,97 | 0,55 | Токоограничитель, трансформатор |

В ходе работы были автоматизированы стенды для проведения экспериментов и созданы программы для проведения расчетов, усовершенствованы и созданы под новые задачи новые устройства. Полученные результаты позволяют получать необходимые для расчета устройств данные быстрее, и с большей точностью.

Помимо полученных результатов, в процессе исследований влияния внешнего магнитного поля на анизотропию критического тока ВТСП лент было обнаружено новое явление зависимости критического тока от направления внешнего магнитного поля. Данное явление не встречалось ранее в научной литературе, и результатам по обнаруженному эффекту посвящена следующая глава данной диссертации.

### 3.8. Выводы к главе 3.

В ходе работы были исследованы образцы ВТСП лент следующих перспективных производителей сверхпроводников:

1. SuperPower;
2. American Superconductors;

3. Sumitomo Electric Ind.;
4. SuperOx;
5. SuNAM.

Предметом исследования являлись: критический ток образцов; однородность критического тока по длине ВТСП ленты; определение минимального диаметра изгиба, при котором ВТСП лента не теряет своей токонесущей способности; определение зависимости критического тока от величины внешнего магнитного поля. На основе полученных данных построен график зависимости критического тока ВТСП лент от величины внешнего параллельного и перпендикулярного магнитного поля. На основании результатов проведенных исследований, составлена таблица рекомендаций по применению той или иной ВТСП ленты в разных электротехнических устройствах.

# ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ВТСП ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

## 4.1. Описание особенности поведения.

Во время измерений анизотропии критического тока ВТСП лент 2-го поколения во внешнем магнитном поле было обнаружено новое явление: при одном и том же направлении транспортного тока в ленте, значение критического тока было различным при противоположных направлениях магнитного поля. Причем, результаты показали, что значения критического тока при разных направлениях транспортного тока в одном и том же внешнем магнитном поле величиной 30 мТл были 101,3 А и 114,6 А. То есть разница составила 13,3 А, при максимальном критическом токе 114,6 А, что составляет больше 10%. Если это явление не спонтанное, а постоянное, тогда есть возможность моделировать устройства с критическим током, потенциально на 10% большим. Для примера, коаксиальный кабель из сверхпроводящей ленты содержит порядка 20 токонесущих жил. При обычных расчетах критический ток такого кабеля рассчитывался бы как 20*100 А = 2000 А. В случае, когда мы знаем, что при определенной ориентации критический ток единичной ленты может составлять больше 110 А, то допустимый ток ленты рассчитывался бы как 20*110 А = 2200 А. Поэтому была поставлена задача исследовать данное явление, и, первую очередь, определить его основные закономерности. Например, является ли оно характерным на всей длине ленты; является ли это явление общим для всех сверхпроводников, или это случайность, обнаруженная в конкретной ленте. Изучению этих вопросов и посвящена данная глава.

## 4.2. Возможные причины явления.

В первую очередь, необходимо было установить закономерность данного явления. В исходном эксперименте проводилось изменение направления транспортного тока. Известно, что в зависимости от

направления транспортного тока при сохранении магнитного поля, меняется направление силы Лоренца, что видно по формуле:

$$\overrightarrow{F_L} = q \times [\vec{v} \times \vec{B}] \quad (9)$$

На рис. 4.1 показано направление силы Лоренца в зависимости от направления тока (применительно к формуле – направление заряженных частиц) и индукции внешнего магнитного поля. Видно, что направление $\overrightarrow{F_L}$ совпадает в случаях, когда изменения и тока и поля происходят одновременно (+I → –I, +B → –B). Отсюда вытекает, что одним из подтверждений основного вклада силы Лоренца в наблюдаемое явление будет совпадение значения критического тока при одинаковых, но противоположных по направлению значениях транспортного тока и магнитной индукции внешнего поля.

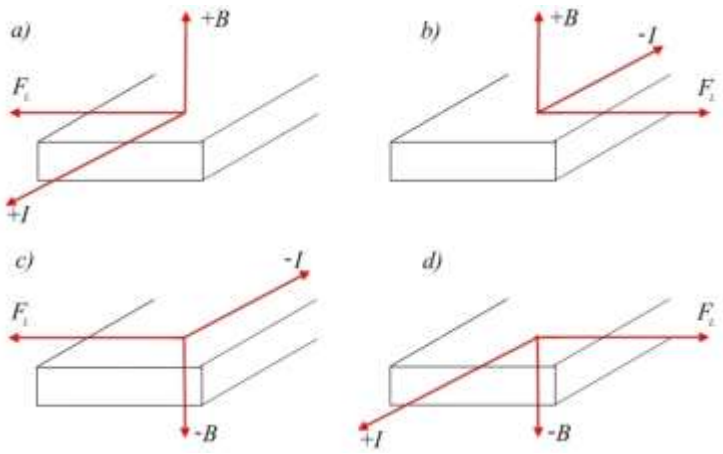



Рис. 4.1. Направления протекания тока и перпендикулярного внешнего магнитного поля по отношению к сверхпроводящей ленте.

Существуют две основные гипотезы зависимости критического тока от направления транспортного тока: 1) особенности строения структуры ВТСП лент 2-го поколения, которое берется за основу при так называемом «вихревом диоде», либо 2) неравномерное распределение плотности токов, дефекты в пленке. Проверить гипотезы можно путем разрезания широкой ленты на узкие. В таком случае, в зависимости от результатов, можно будет определить, строение или дефекты являются причиной эффекта.

Первый вариант – зависимость критического тока от направления транспортного тока за счет особенностей структуры – проявится в подобии результатов на всех полученных в результате разрезания лентах. Критический ток во внешнем магнитном поле при одном и том же направлении силы Лоренца должен быть эквивалентен во всех разрезанных лентах. Это свойство должно проявляться как в параллельном, так и в перпендикулярном поле (рис. 4.2).

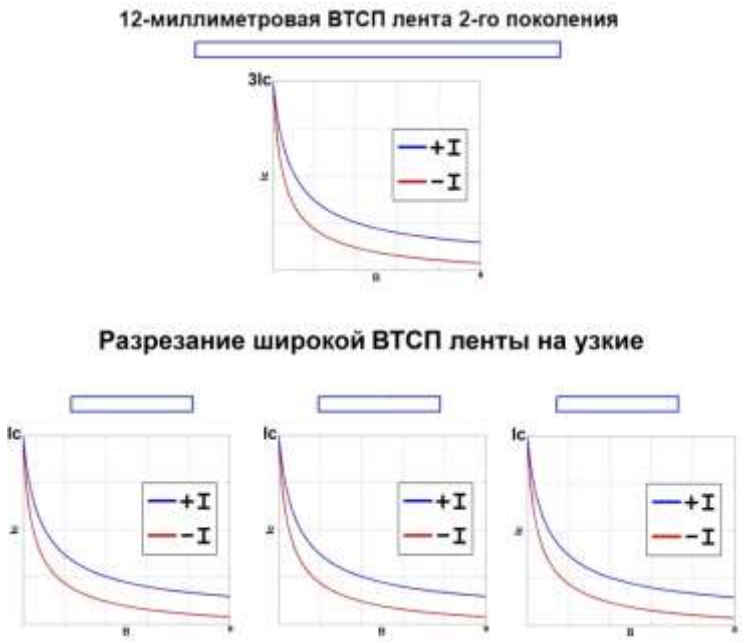



Рис. 4.2. Для случая основного влияния особенностей структуры несимметричность анизотропии критического тока 12-мм ВТСП ленты 2-го поколения и 4-мм ВТСП лент, полученных путем разрезания широкой.

Второй случай – неравномерность распределения токов по ширине ленты за счет дефектов – будет отражено в разнице результатов. Если у одной краевой, полученной в результате разрезания ленты критический ток во внешнем поле больше при одном направлении транспортного тока, то у ленты с другой стороны широкой критический ток больше при другом направлении транспортного тока (рис. 4.3).

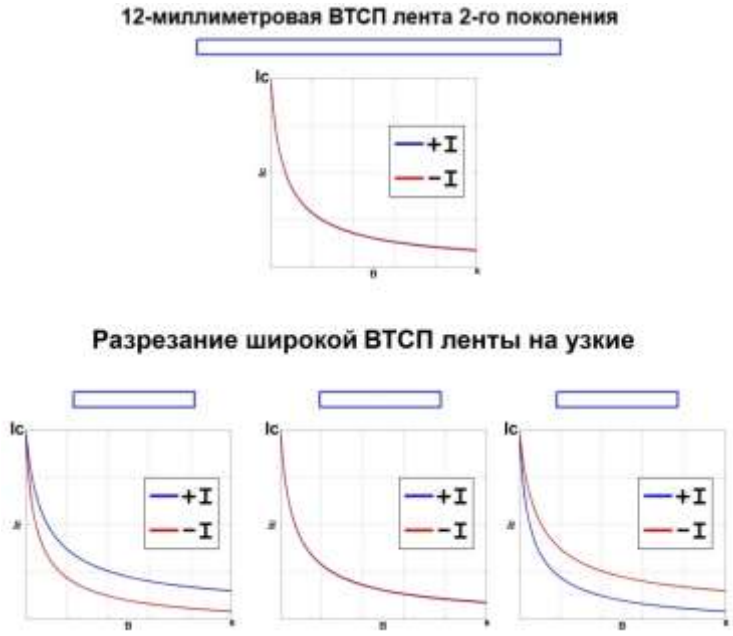



Рис. 4.3. Для случая основного влияния неравномерного распределения плотности тока по ширине несимметричность анизотропии критического тока 12-мм ВТСП ленты 2-го поколения и 4-мм ВТСП лент, полученных путем разрезания широкой.

Причем, это характерно не для всех направлений силы Лоренца, а хотя бы для одного. Например, общеизвестно, что около подложки сверхпроводник наиболее однороден, и по мере удаления слоев от подложки проявляется наибольшее число дефектов. На рис. 4.4 показаны гранулы слоя ВТСП 2-го поколения около подложки и на верхнем слое [25]. Видно, что в слое близ подложки гранулы сверхпроводника ориентированы одинаково. А ближе к серебру идут более разориентированные частицы, приводящие к ухудшению токонесущих свойств в тех слоях. Поэтому в случае, когда внешнее магнитное поле параллельно плоскости ленты, то есть сила Лоренца направлена перпендикулярно плоскости сверхпроводника, критический ток может быть одинаковым для всех разрезанных лент. Но при направлении силы Лоренца в плоскости ленты будет проявляться разница в результатах, описанная выше.

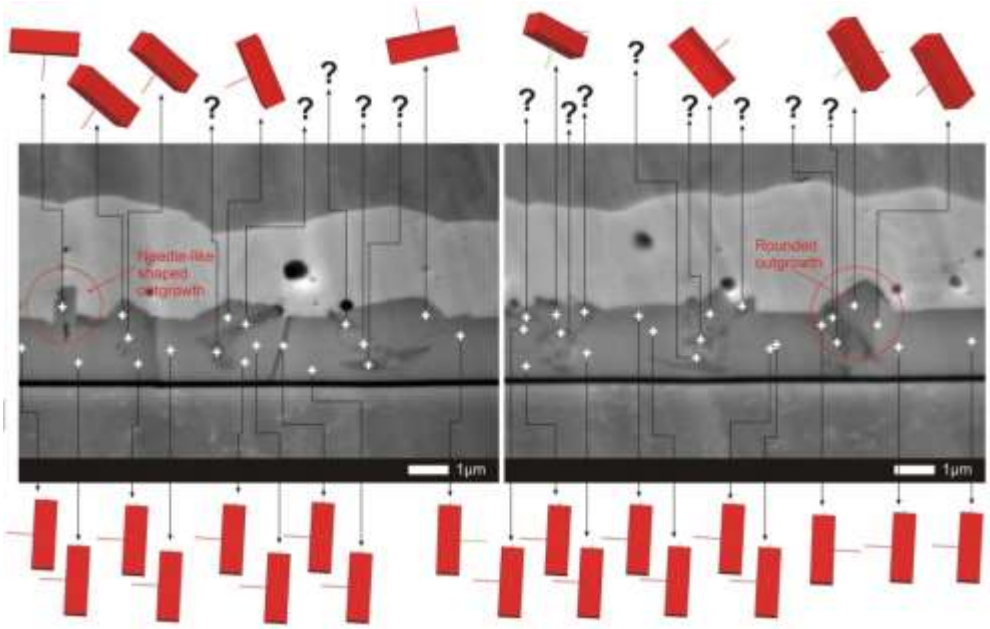



Рис. 4.4. Ориентация гранул сверхпроводника в ВТСП ленте 2-го поколения [25].

При обоих предположениях разница в значениях критического тока при разном направлении силы Лоренца будет проявляться даже в малых полях, и снисходить до нуля в больших полях. Поэтому нет необходимости проверять данное явление в больших магнитных полях.

### 4.3. Методика проведения эксперимента.

Исследования проводились по методике, описанной в пункте 2.3 данной работы. После проведения одного эксперимента менялись полярности либо магнита, либо транспортного тока, и эксперимент повторялся. Чтобы избежать ошибки, связанной с остаточным током, порядок перемены полярностей каждый раз проводился разный.

Для проведения эксперимента с разрезанием широкой ВТСП ленты на узкие в качестве образца была использована 12-миллиметровая ВТСП лента 2-го поколения компании SuperOx по следующим причинам:

- она имеет критический ток, сопоставимый с лучшими лентами в мире;
- лента SuperOx создается как сверхпроводник для разных устройств, и наше исследование представляет большой интерес не только для

создателей устройств, но и для производителя ленты, как информация для совершенствования своей продукции;

- работа велась непосредственно с компанией SuperOx, и по мере необходимости была возможность в кратчайшие сроки добыть образцы и информацию по ним для дальнейших экспериментов;

Принимая во внимание все условия, лента SuperOx была признана оптимальной для данного эксперимента.

Следующий немаловажный вопрос, возникший перед нами: каким образом производить разрезание ленты. Для разрезания 12-мм ленты на три 4-мм ленты обратились в лазерный центр «МИФИ», где разрезание проводилось при помощи твердотельного лазера Nd:YAG с длиной волны 1,064 нм и мощностью 150 мДж. Пучок лазера 10 мкм, при этом область нагрева лазером доходит до 50 мкм (рис. 4.5). В случае если основной вклад в изучаемый эффект вносит особенность структуры, то эти детали не должны сильно отразиться в нашем эксперименте.

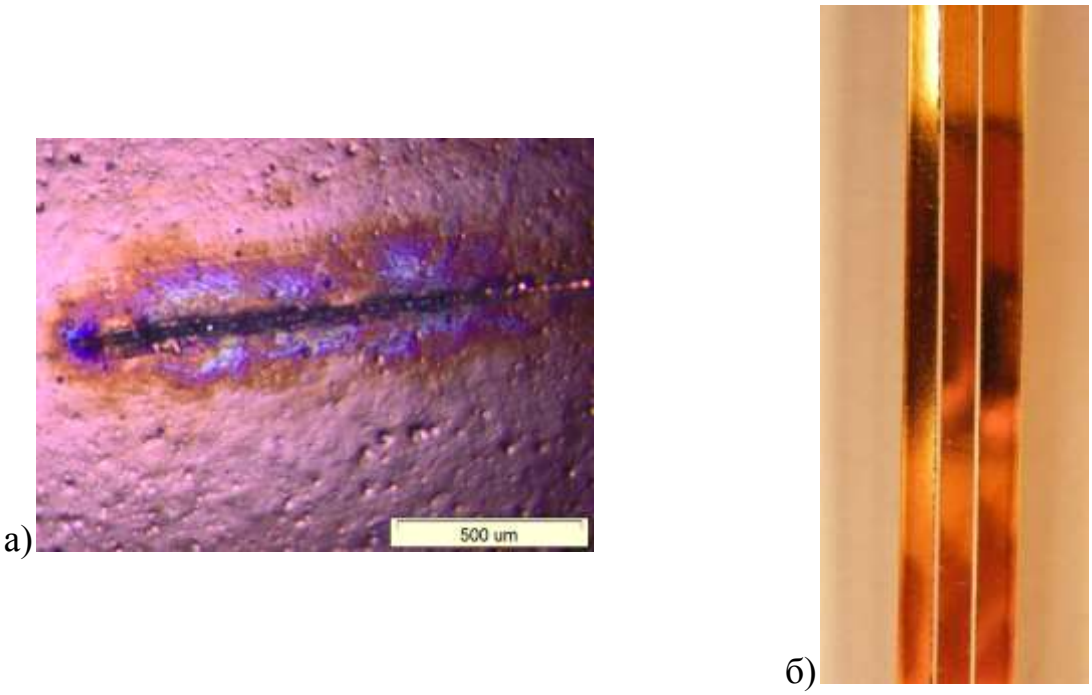



Рис. 4.5. Разрезание 12-мм ВТСП ленты 2-го поколения SuperOx лабораторным твердотельным лазером в лазерном центре «МИФИ»: а) в процессе резки; б) результаты разрезания.

При испытании исходной ленты на несимметричность анизотропии критического тока во внешнем перпендикулярном магнитном поле, дающем силу Лоренца в плоскости сверхпроводника, разница составила всего 5 А. В параллельном магнитном поле при критическом токе исходной ленты 540 А, разница в значениях критического тока превысила 30 А.

Было решено разрезать ленту вдоль на три части, при этом ширина каждой ленты составила 4 мм.

### 4.4. Результаты.

В первую очередь, необходимо было определить, является ли данное явление характерным для всех лент. Все измерения проводились в сверхпроводящем магните в интервале полей от 0 мТл (отсутствие внешнего поля) до 600 мТл при разных направлениях транспортного тока и внешнего магнитного поля.

Как было показано на рис. 4.1, при различных направлениях транспортного тока критический ток ВТСП ленты SuperPowerM3-725-2FS при внешнем магнитном поле 60 мТл различный. Более детальные исследования для ВТСП ленты SPM3-725-2FS дали следующие результаты (рис. 4.6).

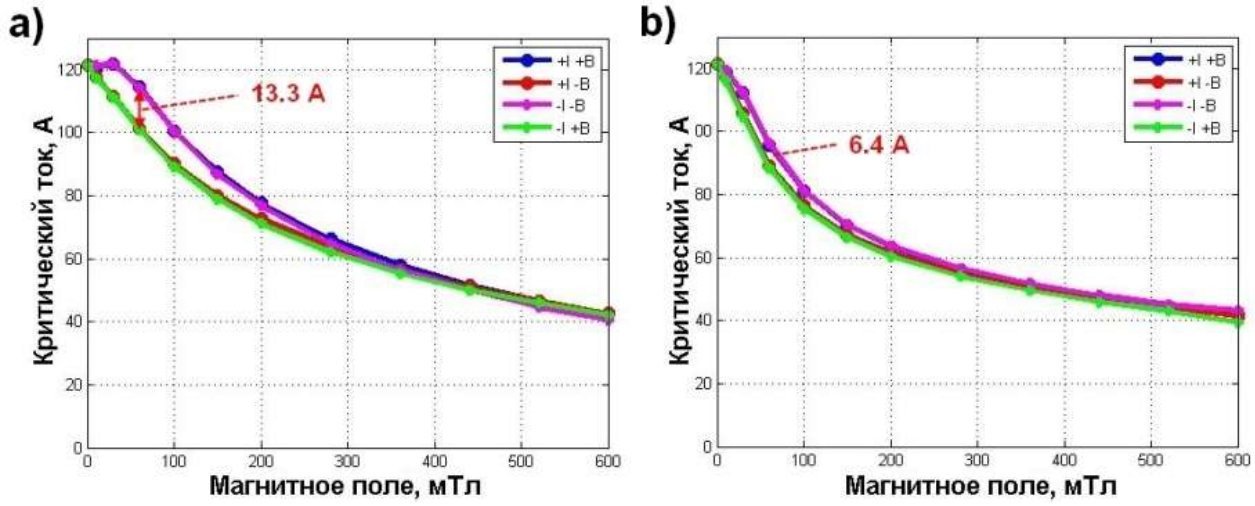


Рис. 4.6. Зависимость критического тока в ВТСП ленте 2-го поколения SPM3-725-2FS от: a) параллельного внешнего магнитного поля (α = 0˚); b) перпендикулярного внешнего магнитного поля (α = 90˚), где «+» и «—» показывают направления тока и поля

Аналогичный эксперимент был проведен с другими ВТСП лентами 2-го поколения: компании SuperPower – SP 070716-1C (рис. 4.7) и компании American Superconductors – AMSC 476A-3-69-129 (рис. 4.8):

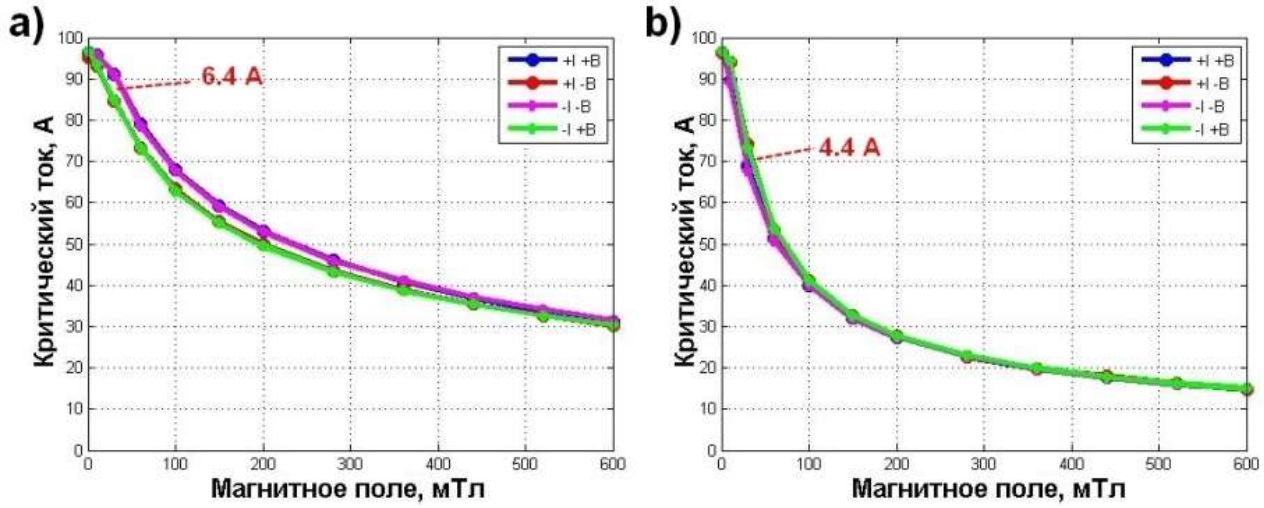



Рис. 4.8. Зависимость критического тока в ВТСП ленте 2-го поколения SP 070716-1C от: a) параллельного внешнего магнитного поля (α = 0˚); b) перпендикулярного внешнего магнитного поля (α = 90˚), где «+» и «—» показывают направления тока и поля.

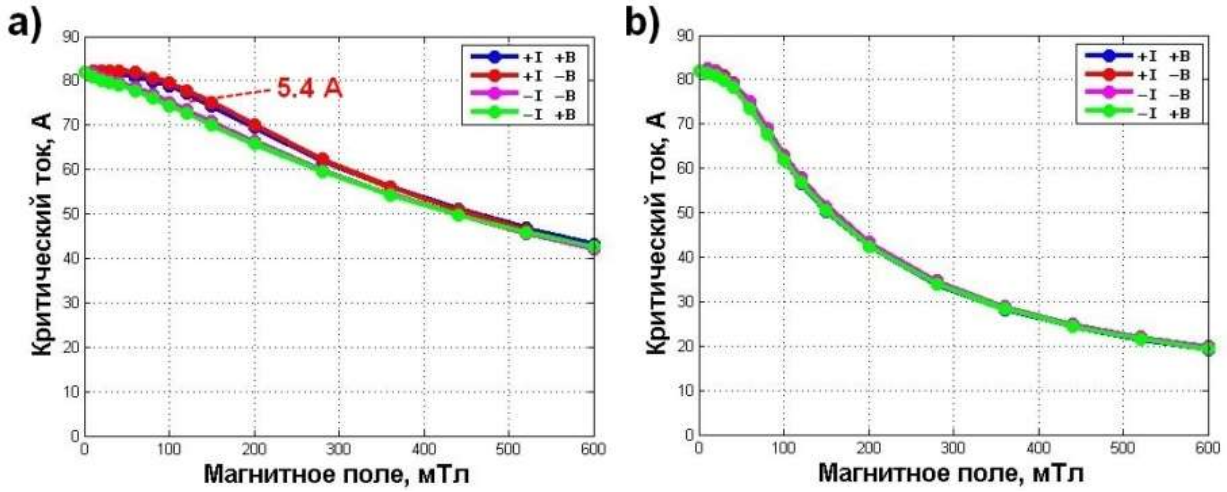


Рис. 4.8. Зависимость критического тока в ВТСП ленте 2-го поколения AMSC 476A-3-69-129 от: a) параллельного внешнего магнитного поля (α = 0˚); b) перпендикулярного внешнего магнитного поля (α = 90˚), где «+» и «—» показывают направления тока и поля.

На рис. 4.6-8 видно, что данное свойство – различие в значениях критического тока – характерно для всех измеренных образцов ВТСП 2-го поколения. Различие в критических токах может доходить до 10 % и более, особенно в поле, параллельном поверхности ленты.

Тот же эксперимент был проведен для ленты 1-го поколения SCA09-2008-038-026, компании Sumitomo. Как можно видеть на рис. 4.9, критический ток ленты не зависит от направления силы Лоренца.

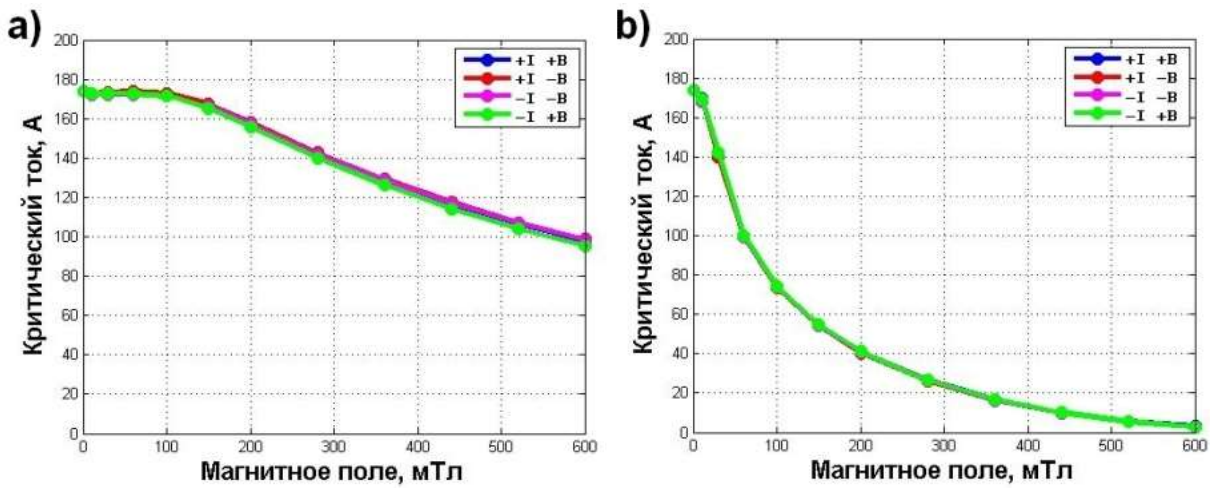



Рис. 4.9. Зависимость критического тока в ВТСП ленте 1-го поколения SumitomoSCA09-038-026 от внешнего магнитного поля (α = 0˚ и α = 90˚), где «+» и «—» показывают направления транспортного тока и поля.

Эксперименты неоднократно повторялись, и результаты были аналогичными: различие в значениях критических токов у ВТСП лент 2-го поколения, и отсутствие различий у ВСТП лент 1-го поколения.

Для наглядности изучаемого эффекта различий критического тока при различных полярностях магнита был проведен эксперимент при слабых полях. В один и тот же образец вводился ток в одном направлении, а

полярность поля изменялась. В итоге была обнаружена небольшая (в абсолютных значениях), но явно прослеживаемая разница критических токов (до 5 А) в кривых зависимости критического тока от поля в случае прямой и обратной полярностей внешнего магнитного поля (рис. 4.10). На рис. 4.10 наглядно видна несимметричность при различных направлениях внешнего магнитного поля.

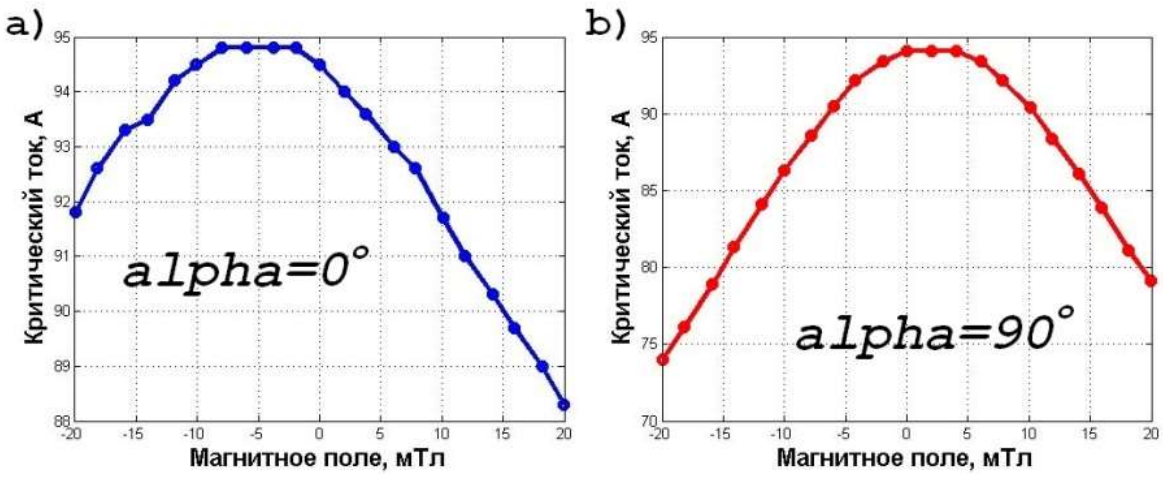



Рис. 4.10. Зависимость критического тока ВТСП ленты SP 070716-1C от внешнего магнитного поля в малых полях для случаев (a) параллельного магнитного поля и (b) перпендикулярного магнитного поля.

Одним из способов объяснения закономерности эффекта зависимости критического тока от направления силы Лоренца является измерение зависимости критического тока в поле у однотипных лент. Поэтому были проведены измерения критического тока во внешнем поле для 5-ти ВТСП лент 2-го поколения компании SuperPower типа M3-747-2MS, нарезанных по 20 см из одного непрерывного отрезка длиной 1 м. Разброс критического тока исходных лент составил от 132,4 А до 138,4 А. В перпендикулярном магнитном поле, когда сила Лоренца направлена в плоскости сверхпроводящего слоя, разница критического тока для случаев реверсивных направлений транспортного тока невелика, и для всех 5 отрезков ленты примерно повторялась (рис. 4.11).

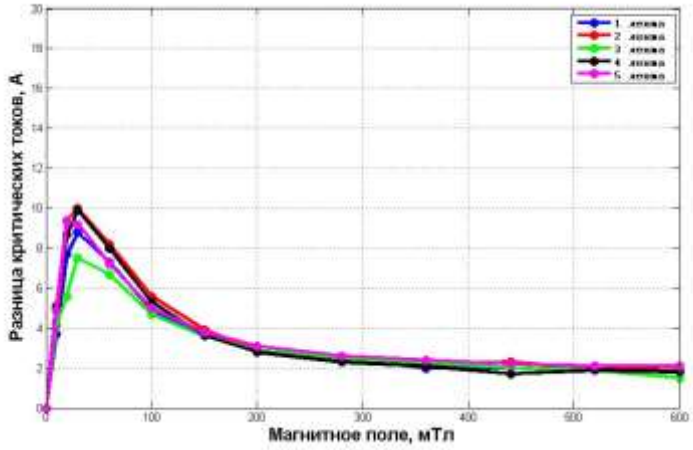



Рис. 4.11. Разница критических токов ВТСП лент SuperPowerM3-747-2MS между значениями реверсивного направления транспортного тока в перпендикулярном внешнем магнитном поле.

В параллельном поле разница значений критического тока больше, чем для случая перпендикулярного поля, и достигает 14 А. При этом, наблюдается явное отличие поведения критических токов у различных лент (рис. 4.12).

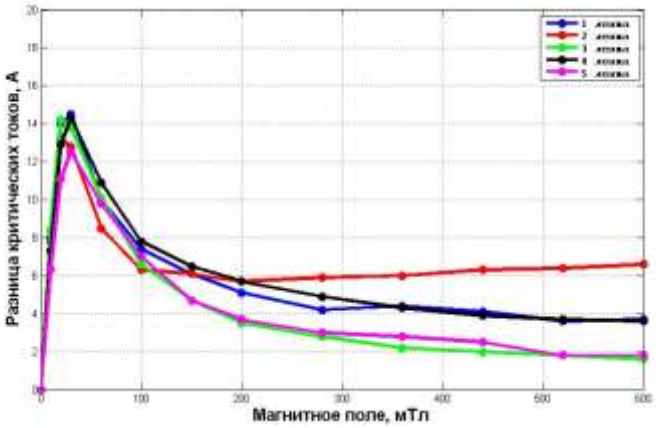



Рис. 4.12. Разница критических токов ВТСП лент SuperPowerM3-747-2MS между значениями реверсивного направления транспортного тока в параллельном внешнем магнитном поле.

Отсутствие закономерности в поведении говорит о том, что явление с большей вероятностью является спонтанным, чем закономерным. С другой стороны, в перпендикулярном магнитном поле, когда сила Лоренца

направлена в плоскости сверхпроводящего слоя, просматривается схожесть зависимостей, что говорит о повторяющемся на протяжении всей длины неравномерном распределении плотности тока по ширине ленты.

В главном эксперименте, который должен был подтвердить одно из предположений, сначала провели измерения зависимости критического тока от направления силы Лоренца для 12-мм ленты компании SuperOx (рис. 4.13). Затем эту ленту разрезали на три 4-мм ленты, и на каждой из них провели измерения критического тока во внешнем магнитном поле при разных направлениях транспортного тока (рис. 4.14). После проведения исследования анизотропии критического тока в поле получили, что для случая параллельного поля у всех трех лент критический ток был выше, когда сила Лоренца направлена в сторону подложки, и суммарная разница критических токов близка к разнице критических токов исходной широкой ленты. В перпендикулярном магнитном поле поведение критических токов краевых лент отличается: в обоих случаях критический ток выше тогда, когда сила Лоренца направлена от края исходной широкой ленты (рис. 4.14). Данный эксперимент подтвердил предположение, что явление несимметричности поведения критического тока во внешнем магнитном поле зависит от распределения плотности тока внутри ВТСП ленты. Этот эффект характерен исключительно для ВТСП лент 2-го поколения вследствие того, что у них большая плотность тока и мельчайший дефект в структуре отражается на токонесущих свойствах.

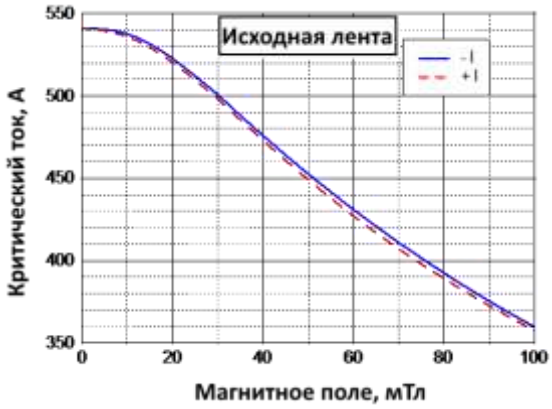



Рис. 4.13. Зависимость критического тока 12-мм исходной ВТСП ленты 2-го поколения от внешнего магнитного поля при разных направлениях силы Лоренца.

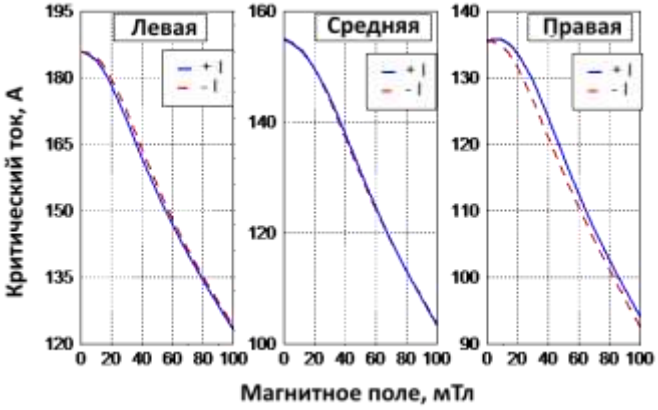



Рис. 4.14. Зависимость критического тока разрезанных 4-мм ВТСП лент 2-го поколения от внешнего магнитного поля при разных направлениях силы Лоренца.

### 4.5. Обсуждение.

В ходе работы были исследованы ВТСП ленты 2-го поколения компании SuperPower (4-мм), American Superconductors (4-мм) и SuperOx (12-мм), а также ВТСП лента 1-го поколения компании Sumitomo. Разница критических токов превышала значения 14 А для 4-мм ВТСП ленты 2-го поколения при критическом токе исходной ленты 130 А, и 30 А для 12-мм ВТСП ленты 2-го поколения при критическом токе исходной ленты 540 А. Проявление данного эффекта во всех исследованных ВТСП лентах 2-го поколения говорит о систематической зависимости, правильное использование которой может увеличить мощность электротехнического устройства до 10% при тех же затратах на ресурсы и тех же габаритах.

Измерения со сменой как направления транспортного тока в ВТСП ленте, так и направления внешнего магнитного поля, продемонстрировали зависимость величины критического тока от направления силы Лоренца: критические токи были различны при различных направлениях силы Лоренца, что отчетливо видно на рис. 4.6-9. Как известно, сила Лоренца действует на движущиеся заряженные частицы, и если проводимости что-то мешает, то критический ток будет меньше. За основу объяснения

обнаруженного эффекта зависимости критического тока от направления силы Лоренца были положены два предположения: особенности структуры, мешающие перетеканию токов в одном направлении сильнее, чем в другом («вихревой диод»), и неравномерное несимметричное распределение плотности тока по ширине и толщине ленты. Отсутствие четкой закономерности в разнице критических токов при воздействии силы Лоренца к подложке и от подложки показывает, что ключевую роль в обнаруженном эффекте играет не структура, а скорее дефекты и неоднородности. При этом при воздействии силы Лоренца в плоскости ленты видна последовательность разницы критических токов, и можно предположить, что по ширине ВТСП лента несимметрична на протяжении всей длины одинаково, что вполне допустимо при сложности и особенностях производства ВТСП лент 2-го поколения.

Другой эксперимент, подтверждающий основной вклад неоднородности плотности тока в ленте в зависимость критического тока от направления силы Лоренца, был проведен с разрезанием ВТСП ленты 2-го поколения SuperOx. По итогам этого эксперимента было выявлено, что при направлении силы Лоренца к подложке ВТСП ленты критический ток всегда выше, а при направлении силы Лоренца в плоскости сверхпроводящего слоя нет четкой зависимости. На основе этого был сделан вывод, что эффект зависимости критического тока ВТСП ленты 2-го поколения от направления силы Лоренца является результатом неравномерного распределения плотности тока по ширине ленты, а также ухудшения качества сверхпроводящего слоя по мере удаления от подложки. Как бы то ни было, эффект характерен для сверхпроводника на протяжении всей его длины, и в случае направления силы Лоренца в плоскости сверхпроводящего слоя разница критического тока прогнозируема, и может быть учтена при производстве электротехнического устройства.

### 4.6. Выводы к главе 4.

В процессе исследования влияния внешнего магнитного поля на величину критического тока ВТСП лент обнаружено новое явление, не имевшее объяснения в научной литературе – несимметричность критического тока ВТСП лент 2-го поколения. Причем, разница между критическими токами при противоположном направлении транспортного тока достигает более 10% от величины критического тока ВТСП ленты в собственном поле.

Для решения данной задачи сначала были исследована анизотропия критического тока для противоположного направления транспортного тока и внешнего поля, и выявлена зависимость: данный эффект проявлялся только у ВТСП лент 2-го поколения, и величина критического тока зависит от направления силы Лоренца. На основе экспериментальных данных были выдвинуты две основные версии природы данного явления: особенности структуры решетки ВТСП лент 2-го поколения, и неоднородность распределения сверхпроводящего слоя по ширине ленты. Для проверки предположений был предложен метод разрезания широкой ВТСП ленты 2-го поколения на узкие, и проверки закономерности поведения разрезанных лент: в случае, если критический ток у всех узких лент будет больше при одном и том же направлении силы Лоренца – подтверждается основной вклад за счет особенностей решетки. Если же у центральной разрезанной ленты разницы в значениях критического тока при противоположных направлениях силы Лоренца наблюдаться не будет, а на краевых узких лентах зависимость будет противоположной – подтверждается основной вклад за счет неоднородности по ширине.

# ГЛАВА 5. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ВТСП ЛЕНТАХ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

## 5.1. Обоснование необходимости разработки методов исследования распределения плотности тока по ширине ВТСП лент.

После разрезания широкой ВТСП ленты 2-го поколения компании SuperOx результаты продемонстрировали, что именно неоднородность ленты приводит к проявлению явления несимметричности критического тока во внешнем магнитном поле. Для подтверждения неоднородности по ширине ленты был проведен эксперимент по измерению распределения плотности тока, данный эксперимент был также дополнен, и выработан новый метод исследования перетекания тока во внешнем магнитном поле.

## 5.2. Методика пересчета из поля в ток.

Все расчеты измерения с помощью датчиков Холла основываются на измерении собственного магнитного поля, созданного лентой, и дальнейшем переводе магнитной индукции в плотность тока.

Пересчет строится на законе Био-Савара-Лапласа (5). Если представить ВТСП ленту в виде множества параллельных полосок единичных размеров, то закон Био-Савара перепишется в следующий вид [40]:

$$\begin{aligned} h_x &= \frac{j(y-\eta)}{2\pi\{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2\}}\,d\xi d\eta \\ h_y &= -\frac{j(x-\xi)}{2\pi\{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2\}}\,d\xi d\eta \end{aligned}. \qquad (10)$$

Формулы (10) рассчитывают величину компонент магнитного поля – вертикальной ($h_y$) и горизонтальной ($h_x$). В нашем случае, измерение распределения плотности токов проводилось только на ВТСП лентах 2-го поколения, поэтому толщину $\eta$ можно принять равной 0. Влияние собственного поля на датчик можно представить как сумму собственных полей каждой полоски:

$$B_i = \sum_k A_{ik} j_k \,. \qquad (11)$$

Получили обратную задачу, которая не имеет определенного решения. Наиболее распространенным методом решения такой задачи является преобразование Тихонова [41].

В качестве проверки программы была выбрана составная функция, которая представлена на рис. 5.1. В ней представлены прямые элементы, точки экстремума, углы, а также уменьшение и увеличение значения.

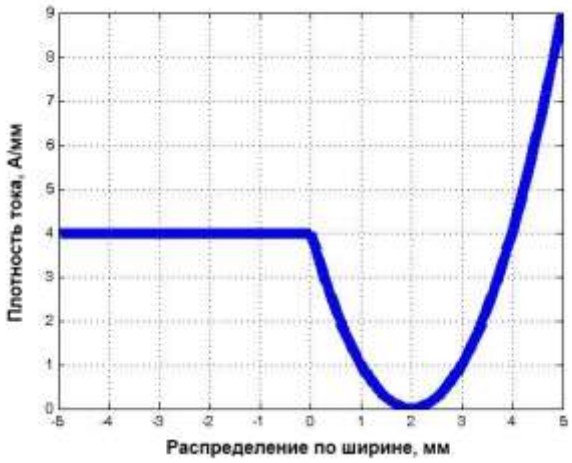



Рис. 5.1. Функция для проверки работы алгоритма.

Для проверки работоспособности нашего алгоритма сначала получили из заданного распределения предполагаемое поле по формуле (10) (рис. 5.2), а потом обратно перевели из поля в распределение (рис. 5.3).

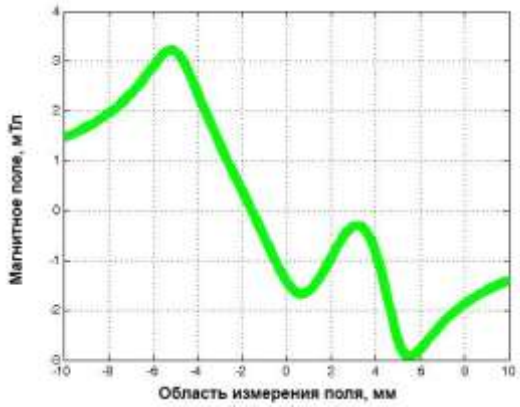



Рис. 5.2. Поле, полученное из модели рис. 5.1 по формуле (10).

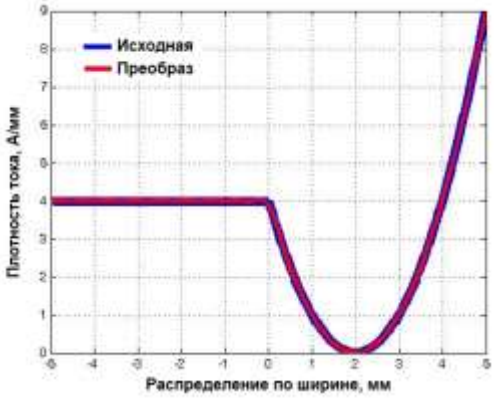



Рис. 5.3. Исходная модель и преобразования из поля из рис. 5.2.

Преобразования методом наименьших квадратов с регуляризацией по Тихонову дают наиболее точные результаты для решения обратных задач. Рис. 5.3 является подтверждением данного предположения, и этот алгоритм был использован автором в ходе работы.

### 5.3. Методы измерения собственного поля ВТСП ленты.

В главе 4 были перечислены основные методы измерения собственного поля ВТСП лент, с их плюсами и минусами. В нашей лаборатории были реализованы два метода: непрерывный метод (метод сканирующего датчика Холла), и дискретный (метод массива датчиков Холла). А также на основе этих двух методов, используя математические преобразования, был получен гибридный метод измерения собственного поля, дающий точные результаты и возможность проводить измерения во внешнем магнитном поле при произвольном угле между направлением магнитного поля и плоскостью поверхности ВТСП ленты.

#### 5.3.1. Непрерывный метод.

В ходе работы была создана установка для измерения магнитного поля методом сканирующего датчика Холла (рис. 5.4), в которой измерение производится с помощью датчика Холла, прикрепленного на держателе. Движение держателя осуществляется при подаче тока на мотор. Сверху расположен измеряющий положение датчика прибор с дисплеем. В нижней части установки располагаются два крепко зафиксированных токоввода, и припаянная к ним лента. Датчик производит движение непосредственно над лентой, поперек её длины. Вся представленная конструкция помещается в ванночку с жидким азотом.

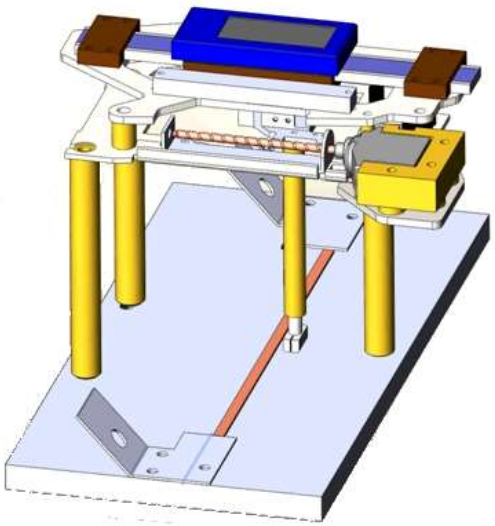


Рис. 5.4. Установка по измерению распределения плотности тока в ВТСП лентах 2-го поколения методом сканирующего датчика Холла.

Полученное с помощью непрерывного метода распределение собственного поля ВТСП лент отличается равномерностью, и при наличии спадов или отклонений, они хорошо видны.

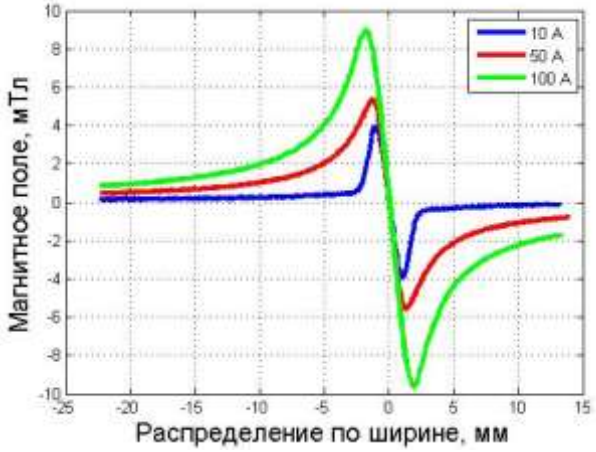



Рис. 5.5. Распределение собственного магнитного поля ВТСП лент 2-го поколения при разном значении транспортного тока.

После получения координат расположения датчика Холла и соответствующего этой координате значения индукции магнитного поля, получили распределение собственного поля ВТСП ленты 2-го поколения. Но

такая важная величина, как расстояние от поверхности ленты до датчика Холла, остается неизвестной. Её можно рассчитать вручную с определенной точностью, но будет большая погрешность. Поэтому помимо обычного перевода из поля в ток, представленного в предыдущем параграфе, параллельно было необходимо решить задачу минимизации при произвольном параметре, который означает расстояние от ленты до датчика Холла. Данная программа была реализована в среде MATLAB и протестирована на случайных данных (приложение Б).

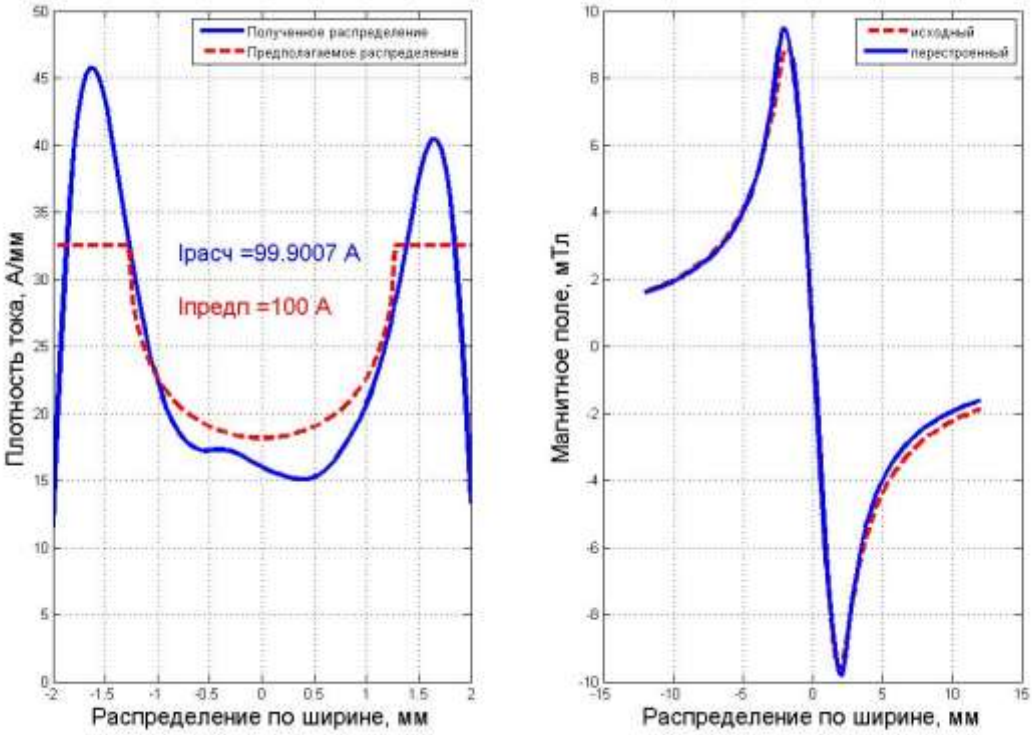



Рис. 5.6. Проверка подлинности определения распределения, пересчет из полученного распределения плотности тока обратно в поле ВТСП ленты 2-го поколения.

В результате всех пересчетов получили распределение плотности тока в поперечном сечении ВТСП ленты 2-го поколения SuperPower M3-747-2MS для значений тока 10 А, 50 А и 100 А (рис. 5.7).

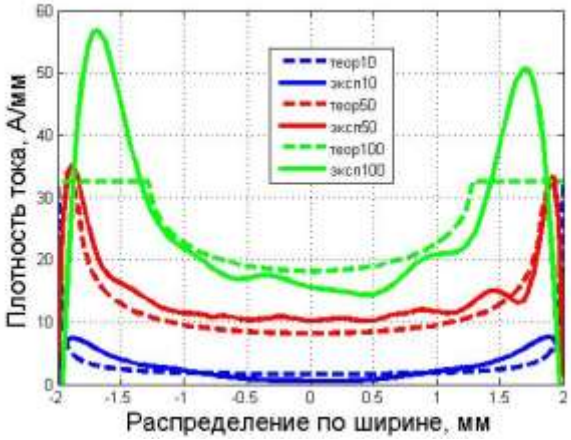



Рис. 5.7. Распределение плотности тока по ширине ВТСП ленты 2-го поколения для разных значений тока.

В общем виде, хорошо прослеживается, что распределение токов по сечению ленты подчиняется модели Брандта.

Метод сканирующего датчика Холла позволил получить распределение плотности тока по ширине ВТСП ленты 2-го поколения SPM3-747-2MS при определенных значениях транспортного тока. При этом на ленту не воздействовали внешние факторы.

### 5.3.2. Дискретный метод.

Возможно, самым простым в реализации эксперимента является метод линейки датчиков Холла. Но простота в проведении эксперимента перекрывается сложностью с обработкой данных, о которой речь пойдет ниже.

При проведении данного эксперимента линейка датчиков Холла располагалась над лентой так, чтобы зафиксировать составляющую поля, перпендикулярную поверхности ленты. Использовавшаяся нами линейка представляет собой набор из 10 датчиков Холла (рис. 5.8), расположенных последовательно.

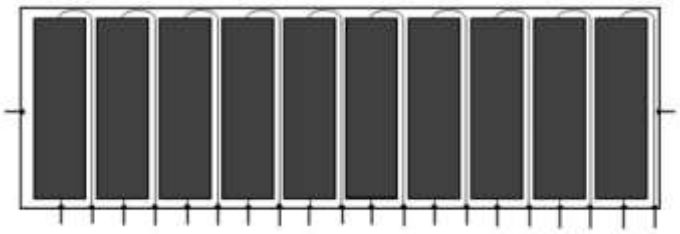


Рис. 5.8. Линейка датчиков Холла.

Сначала эксперимент проводился в криостате без внешнего воздействия, потом повторялся в магните в перпендикулярном и параллельном поле. Использование линейки позволяет проводить измерения с непрерывным вводом тока, в отличие от метода сканирующего датчика Холла. На осциллограф подается напряжение с шунта источника тока (транспортный ток в ленте) и напряжение с датчиков Холла. Благодаря этому отчетливо видно, как в зависимости от изменения транспортного тока меняется собственное поле ленты (рис. 5.9).

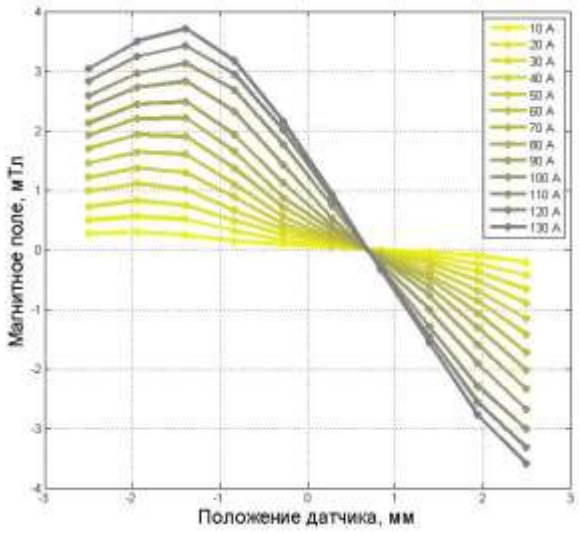



Рис. 5.9. Собственное магнитное поле ВТСП ленты 2-го поколения, зафиксированное массивом датчиков Холла.

При измерении распределения плотности тока по ширине ВТСП ленты во внешнем магнитном поле методика идентична измерению собственного поля с той лишь разницей, что лента с расположенной на ней линейкой

датчиков Холла фиксируется в магните, и при дальнейшем анализе значение внешнего магнитного поля вычитаются из показаний датчиков Холла, и получаем собственного поле ВТСП ленты.

Измерения распределения плотности тока по ширине ВТСП ленты 2-го поколения проводились двух типов: при постоянном внешнем поле и изменяющемся транспортном токе в ВТСП ленте и при постоянном транспортном токе и переменным внешнем поле. Первый тип экспериментов проводился при внешнем магнитном поле 30 мТл (рабочее поля для кабеля, а также поле, при котором явление проявляется наиболее ярко). Затем ввели ток 80 А, и доводили поле до 100 мТл в оба направления. Все эти эксперименты должны были дать картину перетекания токов внутри сверхпроводника.

Большой проблемой в переводе из поля в ток в данном методе, как уже говорилось, являются следующие факторы:

- низкая точность в определении расположения линейки датчиков Холла в плоскости ленты:
- низкая точность в определении расстояния от ленты до линейки датчиков Холла;
- малое количество точек измерения (10 точек).

Поэтому для получения большей точности нами был разработан гибридный метод.

### 5.3.3. Гибридный метод измерения распределения плотности тока в ВТСП лентах 2-го поколения.

Как уже говорилось, в нашей лаборатории измерения собственного поля лент проводилось двумя способами: непрерывным и дискретным методами. Первый дает точные данные, но не позволяет проводить измерения в имеющихся у нас магнитах. Второй дает неточные данные, но является настолько компактным, что позволяет проводить измерения в

магнитах. Но чтобы повысить точность второго метода, его результаты были наложены на результаты первого.

Говоря о правильности данного подхода, опираемся на статью [26]. В данной работе проводились эксперименты над лентой SuperPower, и они показали однородность распределения плотности тока по ширине ленты на протяжении большой длины. Ссылаясь на эту статью, можно заявить, что ошибка за счет неточности области измерения при сканирующем датчике Холла и линейки датчиков Холла, которая составляет не больше 5 мм, не влияет на результаты. Так что, полученные двумя методами результаты можно накладывать друг на друга.

Метод наложения заключался в следующем. Из измерений непрерывным методом получили распределение плотности токов по ширине для значений токов 10 А, 50 А и 100 А. Из второго эксперимента берем значения собственного поля, отвечающие этим значениям транспортного тока. Решая задачу минимизации со следующими параметрами: расположение линейки датчиков Холла в плоскости ленты, расстояние от ленты до линейки датчиков Холла, - находим обе неизвестные величины путем сравнения данных с датчиков и восстановленных по распределению. Это позволяет найти все недостающие нам данные для точности. И уже зная эти параметры, проводим перевод из поля в ток.

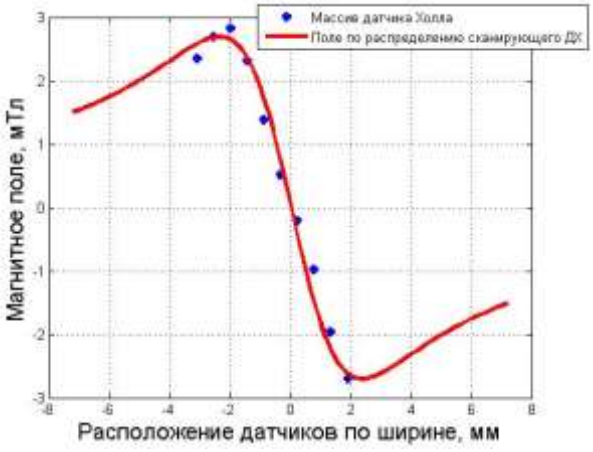



Рис. 5.10. Наложение результатов метода сканирующего датчика Холла и метода массива датчиков Холла при транспортном токе 100 А.

Наложение результатов показало, что массив датчиков Холла находится на расстоянии 0,82 мм от сверхпроводящего слоя, и смещен на 0,94 мм по горизонтальной оси поперек ВТСП ленты. Используя эти данные, были проведены измерения перетекания тока в сверхпроводящем слое во внешнем магнитном поле. Ранее такие измерения не проводились.

### 5.4. Результаты измерений.

Следующим экспериментом было наблюдение за распределением плотности тока в ВТСП ленте 2-го поколения, которая находится в параллельном (рис. 5.11) и перпендикулярном (рис. 5.12) магнитных полях 30 мТл. Это значение поля выбрано из тех соображений, что именно при этом поле наблюдается наибольшая разница в значениях критического тока в зависимости от направления силы Лоренца. А также это характерное магнитное поле для силового кабеля.

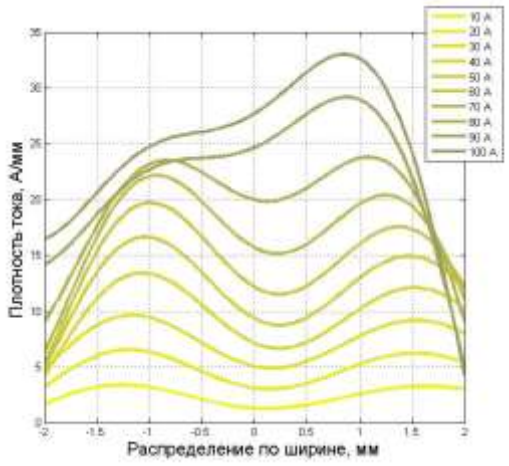



Рис. 5.11. Распределение плотности тока по ширине ВТСП ленты в параллельном внешнем магнитном поле 30 мТл.

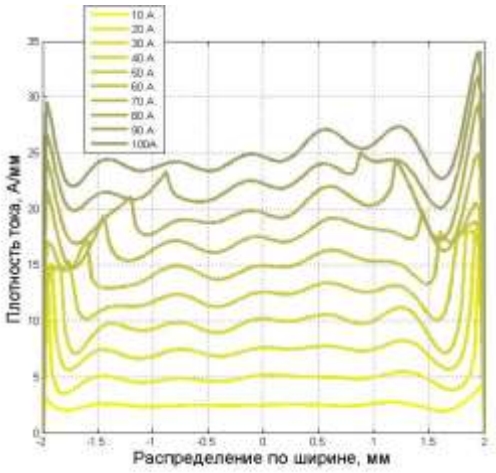



Рис. 5.12. Распределение плотности тока по ширине ВТСП ленты в перпендикулярном внешнем магнитном поле 30 мТл.

В параллельном магнитном поле отчетливо видно, что в отличие от традиционной модели распределения плотности тока по ширине при

критическом значении транспортного тока, плотность тока по ширине неравномерна. Причем, помимо предсказуемых провалах по краям ленты, также наблюдается и неровности посередине.

Используя полученные данные, можно рассчитать допустимое значение внешнего поля для ленты SPM3-747-2MS.

### 5.5. Анализ результатов.

В главе 5 рассматривались методы исследования распределения плотности тока по ширине ВТСП ленты 2-го поколения. В частности, были представлены созданные в нашей лаборатории методы.

Разработанный в нашей лаборатории гибридный метод является уникальным, и насколько известно, не встречался ранее в литературе. Он основывается на двух давно известных и общепризнанных методах: методе сканирующего датчика Холла и методе массива датчиков Холла. Для обоих методов в нашей лаборатории были созданы специальные установки. Первый метод позволяет получать точные данные, но только при определенных, заранее заданных значениях транспортного тока, и при отсутствии внешних факторов. Второй метод позволяет проводить измерения непрерывно, и при любых условиях. Но точность второго метода считается очень низкой, и рассматривается в экспериментах исключительно как качественная задача. Созданный нами гибридный метод, заключающийся в наложении результатов двух известных методов, позволяет значительно повысить точность измерений методом массива датчика Холла. Кроме того, учитывая особенности метода массива датчиков Холла, гибридный метод позволяет проводить точные измерения распределения плотности тока внутри ВТСП ленты 2-го поколения даже находящейся во внешнем поле под любым углом.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать заключение, что нами был разработан абсолютно новый метод расчетов распределения плотности тока по ширине ВТСП ленты 2-го поколения, находящейся во внешнем магнитном поле под любым углом. Для него характерны непрерывное

измерение (наблюдение за протеканием процесса) и большая точность. Это метод позволил наблюдать за явлением перевертыша, и сделать модель поведения плотности тока во внешнем магнитном поле.

## 5.6. **Выводы к главе 5**.

Данная глава посвящена измерению распределения плотности токов по ширине ВТСП ленты, путем решения обратной задачи перевода из собственного поля. Для этого были применены два стандартных метода: непрерывный (сканирующего датчика Холла) и дискретный (линейка датчиков Холла) методы.

Но ни один из данных методов не позволяет измерить распределение плотности токов ВТСП ленты во внешнем магнитном поле. Поэтому был разработан новый, гибридный метод, позволяющий делать точные измерения при небольших габаритах. Он представляет собой наложение результатов сканирующего датчика Холла, дающий максимально точный результат для случая нахождения ВТСП ленты в собственном магнитном поле, на результаты линейки датчиков Холла, что в свою очередь позволяет получить точные значения расположения датчиков Холла во втором методе.

Используя гибридный метод измерения плотности токов по ширине ленты, были получены первые результаты перераспределения токов ВТСП ленты 2-го поколения, находящейся во внешнем параллельном и перпендикулярном полях. Данные результаты позволят моделировать электротехнические устройства, работающие во внешнем магнитном поле, с большей точностью, и устранять проблемные точки уже на стадии моделирования.

# ГЛАВА 6. ТОКОНЕСУЩИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНЕННЫХ МЕТОДОМ ПАЙКИ ВТСП ЛЕНТ 1-ГО ПОКОЛЕНИЯ.

## 6.1. Соединение ВТСП лент.

Как говорилось в главе 1, в производстве существует проблема создания длинномерных однородных по всей длине ВТСП лент, необходимых для электротехнических устройств. Поэтому производители всего мира применяют соединение коротких отрезков для получения необходимой длины сверхпроводника.

## 6.2 Методика измерений токонесущих свойств спаянных ВТСП лент.

Все измерения проводились по методикам, описанным в главе 2. Потенциальные контакты располагались на ВТСП лентах, недалеко от места спая (рис. 6.1).

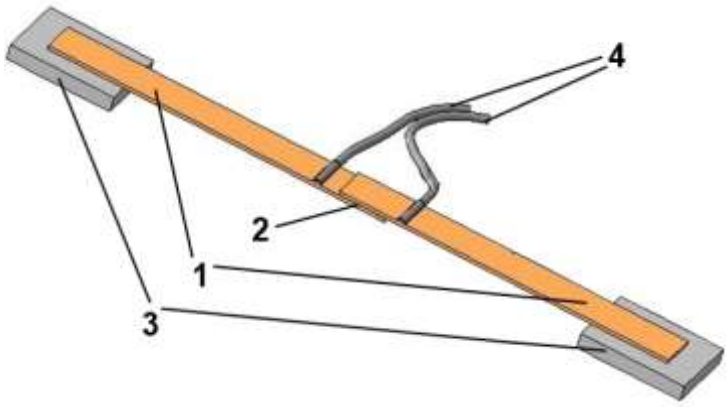



Рис. 6.1. Подготовка спаянных ВТСП лент для измерения ВАХ: 1) ВТСП ленты; 2) пайка; 3) токовводы; 4) потенциальные концы.

В ходе измерения механических свойств спаянных образцов закрепление спаянных ВТСП лент проводилось от места пайки к краям, чтобы давление оказывалось равномерным на обе стороны пайки.

### 6.3.Токонесущие свойства соединенных ВТСП лент.

Исследования токонесущих свойств проводились на спаянных образцах ВТСП лент 1-го поколения компании Sumitomo. Соединение было реализовано при помощи спая двух ВТСП лент внахлест. К нам в лабораторию для исследования были доставлены уже спаянные ленты, поэтому проводился только анализ токонесущих характеристик.

Измерение критического тока проводилось не только в месте спая, но и на прямых участках ленты без какого-либо воздействия. Измерение ВАХ и определение критического тока на прямых участках ленты проводилось так же, как и в главе 3. В случае спаянной ленты ВАХ имела зависимость (1) с наклоном за счет резистивной составляющей. Эта константа была учтена в программе расчетов, и все измерения были проведены с точностью, соответствующей точности измерения критического тока исходных образцов без воздействия. Как показали измерения, на месте спая не обнаружено спадания значения критического тока. Как известно, вследствие термического воздействия при определенной температуре сверхпроводник может перегореть, поэтому можно утверждать, что применяемый поставщиком метод пайки пригоден для соединения ВТСП лент 1-го поколения.

Значения сопротивления на спае представлены в табл. 6.1. Видим, что значение сопротивления не превышает значения 80 нОм, а в среднем составляет 68,5 нОм. Потери на данном сопротивлении при транспортном токе 170 А составляют всего 1,98 мВт, что ничтожно мало с общими потерями в кабеле. Поэтому такой вид соединения применим в электротехнических устройствах, позволяющих использовать спаянные образцы.

Табл. 6.1. Сопротивления на спае ВТСП лент 1-го поколения.

| № | F-440 | F-441 | F-442 | F-445 | F-446 | F-447 | F-452 | F-453 | F-454 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R, нОм | 73,2 | 72,9 | 69,0 | 66,7 | 69,6 | 69,6 | 56,9 | 76,7 | 66,0 |

Предполагалось, что пайка должна оказывать наибольшее влияние на механические свойства ВТСП лент. При минимальном диаметре изгиба ВТСП лент 1-го поколения компании Sumitomo, изначально производителем образцов было заявлено, что никакого изменения критического тока образцов не будет при изгибе диаметром 130 мм. При определении минимального допустимого диаметра изгиба были получены значения, представленные в табл. 6.2.

Табл. 6.2. Минимальный диаметр изгиба ВТСП лент 1-го поколения.

| № | Диаметр изгиба, мм | Критический ток исходной ВТСП ленты, А | Критический ток изогнутой ВТСП ленты, А | Относительный критический ток |
|---|---|---|---|---|
| F-443 | 60 | 168 | 115 | 0,685 |
| F-445 | 120 | 171 | 166 | 0,971 |
| F-448 | 130 | 168 | 163 | 0,970 |
| F-449 | 130 | 161 | 159 | 0,988 |
| F-440 | 130 | 166 | 166 | 1,000 |

Из табл. 6.2 видно, что при заявленном производителем диаметре изгиба 130 мм, спад критического тока практически отсутствует и находится в пределах критерия 0,95 от критического тока исходной ленты. Также при уменьшении диаметра изгиба до 120 мм также видим сохранение значения критического тока. Заявленный производителем минимальный диаметр изгиба полностью подтвердился. Для сравнения, было проведено измерение тока при диаметре изгиба 60 мм. Критический ток оказался равен 115 А, что составляет 68% от критического тока исходной ленты. Очевидно, что пайка

значительно ухудшила характеристики гибкости ВТСП лент 1-го поколения.

Для оценки возможностей использования соединенной ВТСП ленты 1-го поколения в кабеле помимо стандартных измерений по определению минимального диаметра изгиба были проведены измерения по определению минимального шага намотки на формерах различного диаметра. В качестве диаметров формеров были выбраны 20 мм, 25 мм и 30 мм. Именно эти диаметры выступают в качестве основных при проектировании силового кабеля на основе ВТСП лент.

Длина исходного спаянного образца составляла 40 см. Поэтому измерения проводились от 40 см (прямой образец) с шагом 5 см до 10 см. Результаты для большей наглядности представлены графически на рис. 6.2 в относительных величинах – отношение критического тока намотанной ленты к критическому току исходной ленты. Как и предполагалось, наименьшее влияние на критический ток имеет место при наибольшем диаметре формера. На рис. 6.2 прослеживается, что на всех формерах при шаге намотки 25 см выполняется условие 0,95 от критического тока исходной ленты, что вполне удовлетворяет условиям при создании силового кабеля.

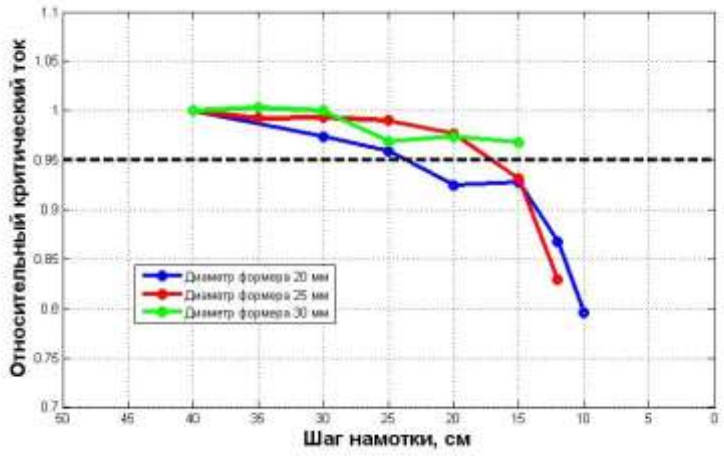



Рис. 6.2. Зависимость относительного критического тока спаянной ВТСП ленты 1-го поколения от шага намотки на формеры разных диаметров.

Олово, индий, свинец и соединения, используемые при пайке, не являются магнитными материалами. Поэтому изменений анизотропии критического тока у спаянных ВСТП лент 1-го поколения по сравнению с ВТСП лентами 1-го поколения без внешнего воздействия не должно произойти. Измерения проводились во внешнем магнитном поле до значений 220 мТл, в широком спектре углов взаимной ориентации между направлением поля и плоскостью поверхности ленты. По полученным результатам (рис. 6.3) прослеживается зависимость, показывающая, что в поле, параллельном плоскости ВТСП-ленты, вплоть до индукции 120 мТл изменения критического тока незначительны. То же относится и к взаимной ориентации под углом 15˚. Однако уже при 30˚ и выше кривая зависимости критического тока $I_c$ от внешнего поля принимает более крутой вид, и даже при относительно небольших изменениях внешнего магнитного поля наблюдается значительный спад $I_c$. В целом, данное поведение соответствует анизотропии критического тока ВТСП лент 1-го поколения во внешнем магнитном поле. На рис. 6.3 представлен график зависимости критического тока во внешнем магнитном спаянной ВТСП ленты при разных углах взаимной ориентации направления поля и плоскости поверхности ВТСП ленты.

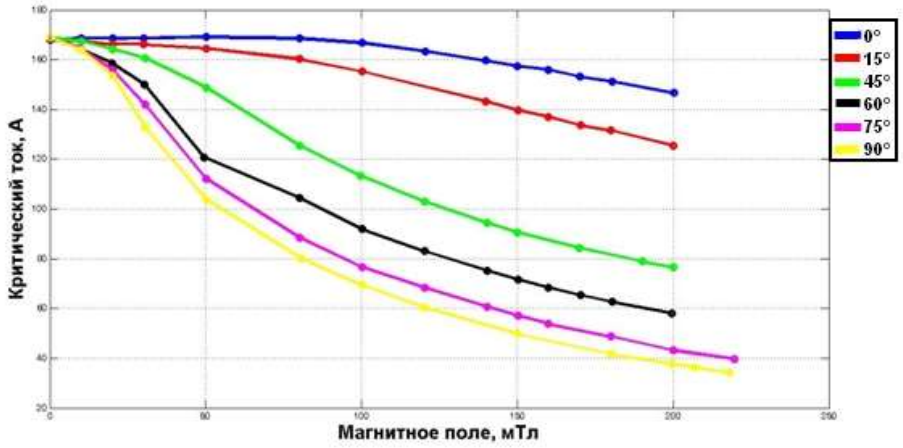



Рис. 6.3. Зависимость критического тока спаянной ВТСП ленты от внешнего магнитного поля при разных углах взаимной ориентации направления поля и плоскости поверхности ВТСП ленты

Измерения для соединенных другим способом ВТСП лент 1-го поколения не проводилось, так как принято считать, что именно соединение внахлест является оптимальным для ВТСП лент 1-го поколения.

### 6.4. Оценка возможности применения соединения ВТСП лент для электротехнических устройств.

Измерения на месте спая показали, что соединение никак не влияет на критический ток соединенных лент – он равняется критическому току исходной ленты. Поведение критического тока спаянных лент во внешнем магнитном поле точно такое же, как и поведение неспаянных, что и предполагалось, так как спай является немагнитным материалом. Соединение лент ухудшает лишь характеристики гибкости ВТСП лент, кроме того появляется резистивная составляющая, в результате чего при протекании транспортного тока происходит нагрев и потеря энергии.

Ясно, что при минимальном диаметре изгиба более 100 мм нет смысла говорить о малоразмерных соленоидах. Но что касается силового кабеля, то соединение лент не оказывает никакого влияния на критический ток. Как показали результаты по определению минимального шага намотки, при шаге 25 см на всех применяемых в эксперименте формерах (диаметрами 20 мм, 25 мм и 30 мм) критический ток выше 95% от критического тока недеформированной ВТСП ленты. Спадание прослеживается только при диаметрах меньше 15 см. Данные результаты вполне приемлемы для силовых кабелей, трансформаторов, а также соединений, не подразумевающих сильной деформации.

Наибольшее беспокойство вызывает наличие резистивного сопротивления спая и предполагаемые потери за счет него. Но при среднем для всех лент сопротивлении из табл. 4.3.1 $R$ = (68,9±5,6) нОм мощность на спая составляет всего лишь

$$P = (4{,}978 \pm 0{,}405) \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \approx (50 \pm 4) \text{ мВт}.$$

Данная оценка приведена с учетом того, что критический ток ВТСП лент равняется 170 А. Если сравнивать с потерями на кабеле (Р = 0,5 Вт/м), то потери на спае незначительны.

На основе всего вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что использование спая для соединения ВТСП лент является простым и практичным способом создания длинномерных кабелей.

### 6.5. Выводы к главе 6.

Как показали проведенные в главе 6 исследования, спай оказывает влияние только на гибкость ВТСП лент 1-го поколения. Поэтому при использовании ВТСП лент 1-го поколения в предложенных в данной главе границах, спай никак не будет ухудшать токонесущие способности ВТСП лент, и позволит создавать длинномерные электротехнические устройства.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

В ходе данной работы были выполнены следующие задачи:

1. Обнаружено и подробно исследовано свойство несимметричности анизотропии критического тока во внешнем магнитном поле ВТСП лент 2-го поколения. Данное свойство было обнаружено на всех исследованных ВТСП лентах 2-го поколения, и не наблюдалось у ВТСП лент 1-го поколения. В ходе проведения ряда экспериментов, в том числе разрезания лазером 12-мм ВТСП ленты 2-го поколения, было установлено, что причиной такой несимметричности анизотропии критического тока во внешнем поле является неоднородное распределение плотности тока по ширине ВТСП ленты.
2. Разработана и успешно испытана новая методика измерения распределения плотности тока по ширине ленты. Данная методика является гибридным методом метода сканирующего датчика Холла и дискретного метода. Новая гибридная методика характеризуется небольшими габаритами измерительного оборудования, что позволяет проводить измерения в устройствах тех же габаритов, что используются для измерения чистой ВТСП ленты. В то же время, точность измерений значительно выше, чем измерения по дискретному методу. Данная методика позволила наблюдать перетекание токов по ширине ленты во внешнем магнитном поле. Помимо этого, подтвердился основной вклад неравномерности распределения плотности токов по ширине ВТСП лент 2-го поколения в эффект зависимости критического тока от направления силы Лоренца.
3. Разработаны новые методики измерения токонесущих свойств ВТСП лент, а также усовершенствованы ранее созданные. Были созданы специальные вставки-держатели для измерений устойчивости ВТСП лент к изгибам, по своим функциям максимально приближающие исследование ВТСП лент к реальным условиям эксплуатации, и учитывающие большое развитие гибкости ВТСП лент 2-го поколения.

4. Проведены измерения токонесущих свойств перспективных ВТСП лент, используемых для создания электротехнических устройств. В их числе ВТСП ленты компаний American Superconductors, SuperPower, Sumitomo Electric Industries Ltd., SuperOx и SuNAM. Проведен анализ свойств ВТСП лент, на основе которого составлена рекомендательная таблица по практическому применению той или иной ВТСП ленты в конкретном электротехническом устройстве.
5. Исследованы токонесущие свойства соединенных методом пайки ВТСП лент 1-го поколения, активно применяемых в электротехнических устройствах из-за отсутствия длинномерных однородных по длине ВТСП лент. Из полученных результатов пайка повлияла только на устойчивость к изгибам ВТСП лент 1-го поколения, несколько ухудшив гибкость. Несмотря на это, спаянная лента является пригодной для создания силовых кабелей и других электротехнических устройств, для которых требуется диаметр изгиба ВТСП ленты не менее 130 мм и шаг намотки на формер диаметром 20 мм не менее 20 см.
6. Была разработана и внедрена уникальная программа в среде LabVIEW, требующая меньшего числа измерительных приборов, чем применялось ранее, и позволяющая проводить массовые измерения. Данная программа соединена с источником тока и вольтметром, и управляет записью данных автоматически. На основе полученных данных специально разработанный алгоритм находит не только критический ток, но и сопутствующие характеристики: параметр нарастания, а также величину сопротивления (при наличии) и отклонение от начальной точки. Все это значительно ускорило и упростило работу, позволило проводить большее количество измерений при более высокой точности результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

[1] Сверхпроводимость, В. Л. Гинзбург, Е. А. Андрюшин, Альфа-М, 2006 г.

[2] High-Temperature Superconducting Materials: A Decade of Impressive Advancement of Tc, C. W. Chu, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, June 1997.

[3] http://www.superox.ru/

[4] Examples and Future Prospects of High-Temperature Superconductor Products, Y. Yamada, M. Mogi and K. Sato, Electric Wire & Cable, Energy, SEI Technical Review, No. 65, October 2007.

[5] The status of HTS ship propulsion motor developments, S. S. Kalsi, B. B. Gamble, G. Snitchler at al., 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting.

[6] 1-G HTS Split Coil Magnet for Research Purposes, S. S. Fetisov, V. V. Zubko, I. P. Radchenko at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, Issue 3, November 2011.

[7] ENSYSTROB—Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application, S. Elschner, A. Kudymow, S. Fink at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21 , Issue 3, June 2011.

[8] Investigation of HTS Materials for Electric Power Equipment, T. Lehner, Workshop on Present Status and Future Perspectives of HTS Power Applications – CIGRE SC D1 WG38 August 29, 2012 –Paris, France.

[9] AmpaCity — Installation of advanced superconducting 10 kV system in city center replaces conventional 110 kV cables, M. Stemmle, F. Merschel, M. Noe at al., Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2013 IEEE International Conference on, October 2013.

[10] First Russian Long Length HTS Power Cable, E. P. Volkov, V. S. Vysotsky, V. P. Firsov, IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM, No. 19, January 2012.

[11] Simulators of Superconductor Critical Current: Design, Characteristics, and Applications, L. F. Goodrich, A. N. Srivastava, T. C. Stauffer, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 96, No. 6, November-December 1991.

[12] Status of Superconducting Cable Demonstration Project in Japan, S. Honjo, T. Mimura, Y. Kitoh at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, Issue 3, June 2011.

[13] Construction and 1st Experiment of the 500-meter and 1000-meter DC Superconducting Power Cable in Ishikari, S. Yamaguchi, Y. Ivanov, H. Watanabe, Physics Procedia, Vol. 81, 2016, Pages 182–186.

[14] Voltage-current characteristics of two soldered 2G HTS tapes, V. S. Vysotsky, I. P. Radchenko, S. S. Fetisov at al., Journal of Physics: Conference Series 234 (2010) 022042.

[15] Development of YBCO High-Tc Superconducting Power Cables, S. Mukoyama, M. Yagi, H. Hirata at al., Furukawa Review, No. 35, 2009.

[16] Characterization of a second generation HTS coil for electrical power devices, D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, F. J. M. Dias at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25 , Issue: 3, June 2015.

[17] STUDY OF HTS INSERT COILS FOR HIGH FIELD SOLENOIDS, V. Lombardo, E. Barzi, G. Norcia at al., Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol. 55, 2010.

[18] 1G versus 2G – comparison from the practical standpoint for HTS power cables use, V. E. Sytnikov, V. S. Vysotsky, I. P. Radchenko at al., Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012058.

[19] The Study of Mechanical Properties of HTS Tapes for Power Cables Use, V. E. Sytnikov, I. P. Radchenko, K. A. Shutov at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, June 2009.

[20] Study of HTS Wires at High Magnetic Fields, D. Turrioni, E. Barzi, M. J. Lamm at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, June 2009.

[21] Critical current measurements of DI-BSCCO tapes as a function of angle in high magnetic fields, P. Sunwond, J. S. Higgins, D. P. Hampshire, Journal of Physics: Conference Series 234 (2010) 022013.

[22] Practical vortex diodes from pinning enhanced YBa2Cu3O7-d, S. A. Harrington, J. MacManus-Driscoll, J. H. Durrell, Applied Physics Letters 95(2) · April 2009

[23] Vortex diode effect in pinning enhanced thin films, J. H. Durrell, S. A. Harrington, R. Dinner at al., abstract for Conference on Conducted Applications,

[24] Magnetic measurement of the critical current anisotropy in coated conductors, F. Hengstberger, M. Eisterer, H. W. Weber, Superconducting Science and Technology, 24 (2011) 045002 (5pp).

[25] Investigation of defects in functional layer of high temperature superconducting tapes, M. Pekarč íková, M. Skarba, P. Konopka at al., Physica C, February, 2014.

[26] Field mapping measurements to determine spatial and field dependence of critical current density in YBaCuO tapes, J. Leclerc, K. Berger, B. Douine at al., Physica C: Superconductivity and its Applications (2013) pp. 158-164.

[27] Magnetization of High-Field Superconductors, C. P. Bean, Reviews of Modern Physics, January 1964.

[28] Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field, E. H. Brandt, M. Indenbom, Physical Review B, Vol. 48, No. 17, November 1993.

[29] Direct observation of the current distribution in thin superconducting strips using magneto-optic imaging, T. H. Johansen, M. Bazilievich, H. Bratsberg at al., Physical Review B, Vol. 54, No. 22, December 1996.

[30] The measurement of current distribution in superconducting tape. Comparison of destructive and non-destructive methods, Pavol Ušák, Physica C 384 (2003) 93-101.

[31] Current distribution in HTSC tapes obtained by inverse problem calculation, M. Carrera, X. Granados, J. Amoros at al., Journal of Physics: Conference Series 234 (2010) 012009.

[32] Investigation of superconductor uniformity in CC tapes by magnetic field mapping, M. Solovyov, J. Souc, F. Gomory, Physics Procedia 36 ( 2012 ) 617 – 622.

[33] Numerical Analysis of Non-Uniformities and Anisotropy in High-Temperature Superconducting Coils, D. Hu, M. D. Ainslie, J. Zou at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3, June 2015.

[34] http://www.keysight.com/ru/pc-1000000169%3Aepsg%3Apgr/dc-power-supplies?nid=-536902253.0&cc=RU&lc=rus

[35] http://www.tek.com/keithley-low-level-sensitive-and-specialty-instruments/keithley-nanovoltmeter-model-2182a

[36] http://www.superpower-inc.com/

[37] http://global-sei.com/super/hts_e/

[38] http://www.amsc.com/

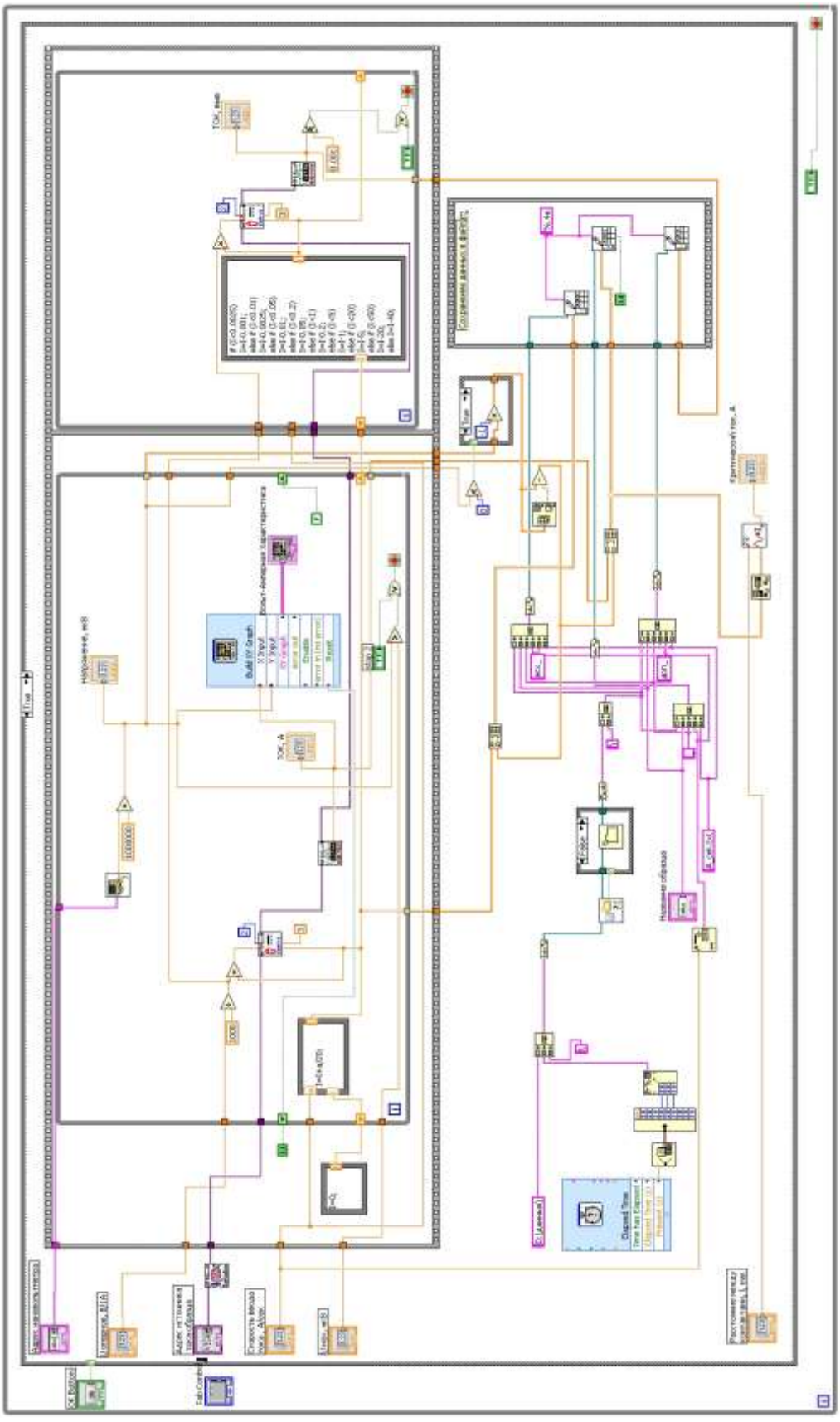
[39] http://i-sunam.com/home/en_product,1,3,1,1,1

[40] HTS twisted stacked-tape cable conductor, M. Takayasu, L. Chiesa, L. Bromberg at al., Superconductor Science and Technology, 25 (2012) 014011 (21pp).

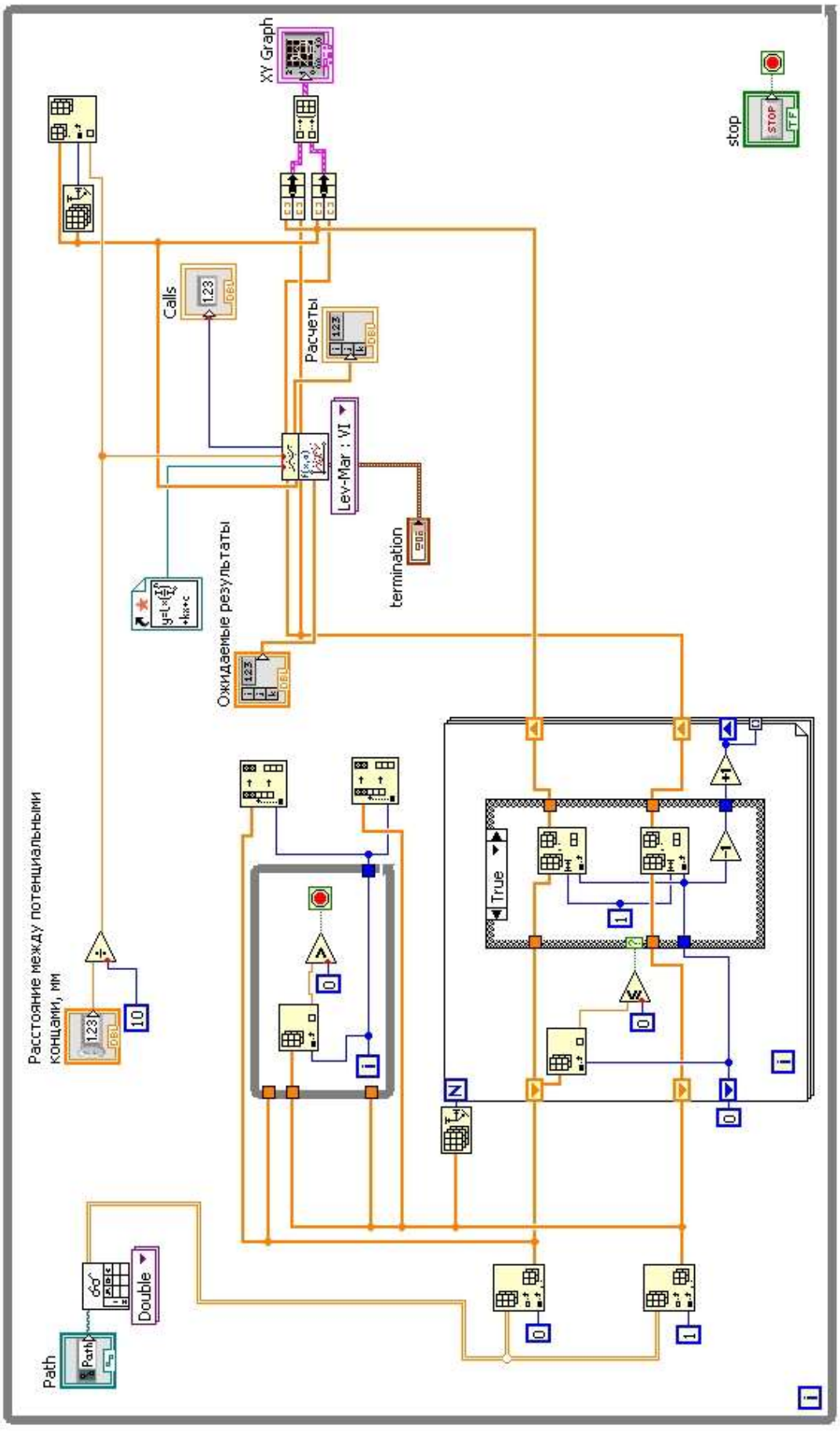
[41] Current Distribution in Coated Conductor Under External Magnetic Field Up to 5 T, A. Miyazoe, M. Sekino, T. Kiyoshi at al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21 , Issue 3, June 2011.

**Приложение А.**

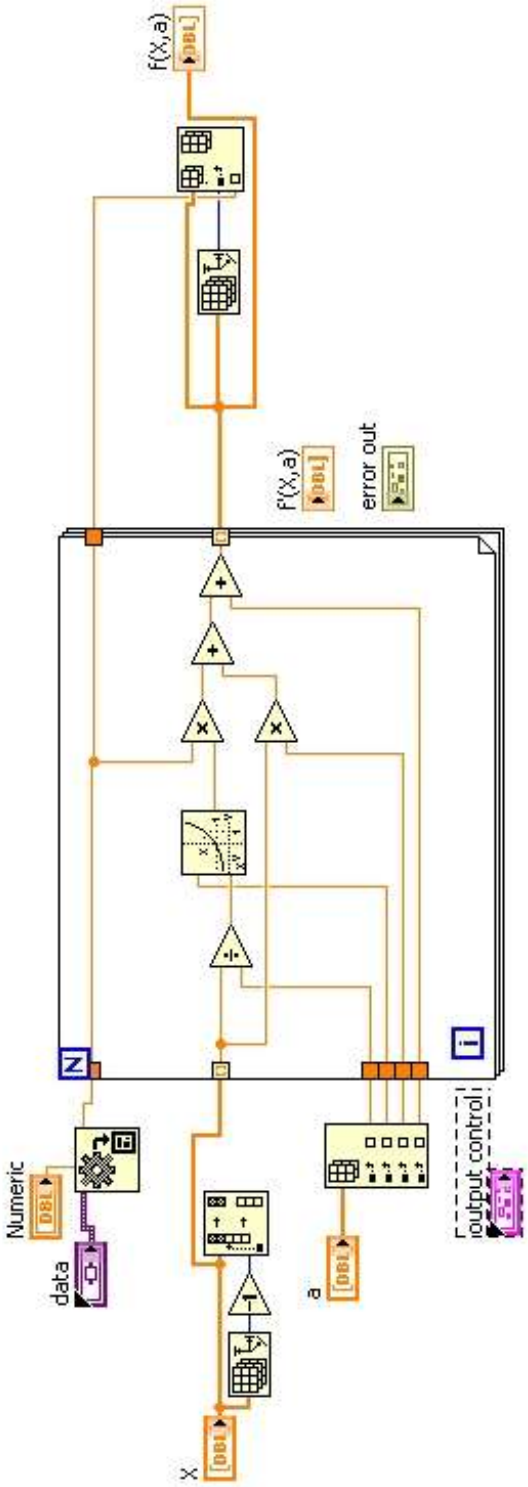
Код программы автоматического измерения критического тока ВТСП лент в среде LabVIEW.



Код определения критического тока ВТСП ленты, подпрограмма.



Функция нахождения критического тока для подпрограммы в LabVIEW.



**Приложение Б.**

Код программы в среде MatLab для решения обратной задачи по нахождению распределения плотности тока по ширине ВТСП ленты 2-го поколения из измеренного распределения собственного поля.

```
function j = raspr(j0)

M = 101;     % количество точек измерения поля по ширине
N = 101;     % количество точек по ширине ВТСП ленты 2-го поколения
h = 0.84;    % мм, расстояние от поверхности ленты до датчика Холла
m0=4*pi*10^-7;  % магнитная постоянная
w = 4;       % мм, ширина ВТСП ленты
b = 3*w;     % область анализа внешнего магнитного поля

B_isk = dlmread('D:\MATLAB R2014a\MATLAB\ДатчикХолла\HPL2B30PER_100A.txt');

By = B_isk;

r = linspace(-3.1,1.9,10);  % расположение датчиков на линейке Датчиков
                            % Холла с учетом поправки

x = linspace(-w/2,w/2,N);   % расположение точек по ширине ВТСП ленты

xi = linspace(-3.1,1.9,101);% расположение точек по области измерения поля

I = 100;         % А, транспортный ток
Ic = 130;        % А, критический ток ВТСП ленты

B = interp1(r,By',xi,'pchip','extrap');

A = zeros(N,M);

lambda = 0.01;  % коэффициент для регуляризации Тихонова

for k = 1:M
    for i = 1:N
        A(i,k) = (- m0/(2*pi)*1e6*(b/(N-1))*(xi(k) - x(i))/((xi(k) - ...
            x(i))^2 + h^2));
    end
end

[U,s,V]=csvd(A');

for l = 1:3

[j,rho,eta]=tikhonov(U,s,V,B',lambda,j0');

j0 = j';

end

B_inv = zeros(1,M);
for k = 1:M
    for i = 1:N
```

```
        B_inv(k) = B_inv(k) + A(i,k)*j(i);
    end
end

subplot(1,2,2);

plot(r,B_isk,'*b',xi,B_inv,'-r','LineWidth',3);
grid on;

subplot(1,2,1);
plot(x,j0,'-b',x,curr(x,I,Ic),'-r','LineWidth',3);
grid on;

end
```

**Благодарность!**

Я выражаю глубокую признательность за оказанное содействие и поддержку всему коллективу отдела №4 ОАО «ВНИИКП». Дружной командой вместе с начальником лаборатории Фетисовым С. С., Зубко В. В., Занегиным С. Ю., Носовым А. А. мы разрабатывали новые методики, устройства, написали совместные научные работы, представленные на престижных конференциях и опубликованные в известных научных изданиях.

Особая благодарность с. н. с. И. П. Радченко, инж. Л. Г. Шаляпиной, с. технику Климкину А. А., за всеобъемлющее содействие и наставление в выполнении всех работ, представленных в диссертации, а также тесную работу на протяжении всей деятельности во ВНИИКП.

Искренняя благодарность в. н. с. Потаниной Людмиле Владимировне, своими знаниями и опытом помогавшей с написанием и оформлением диссертационной работы.

Неоценимая благодарность моему научному руководителю, д. т. н. Высоцкому В. С. Виталий Сергеевич вел мою научную деятельность от студенческой скамьи до ученой степени кандидата технических наук, всегда уделяя много внимания совершенствованию моих навыков, ведя в нужном направлении мои исследования, делясь своими богатыми опытом и знаниями для моего постоянного роста.

Отдельно хочется поблагодарить моих родителей. Всё, чего достиг на сегодняшний момент, и что смогу достичь – большой вклад родителей, своей заботой, поддержкой помогающих развиваться и стремиться к новому, преодолевать возникающие трудности и реализовывать планы и цели.