

*На правах рукописи*



Дегтяренко Павел Николаевич

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ НА ТРАНСПОРТНЫЕ  
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ  
СВЕРХПРОВОДНИКОВ С ВЫСОКОЙ ДИСПЕРНСОСТЬЮ**

Специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении науки  
Объединенном институте высоких температур Российской Академии  
Наук

Официальные оппоненты:

**Титова Светлана Геннадьевна**

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник  
Института Металлургии УРО РАН, г. Екатеринбург

**Столяров Василий Сергеевич**

доктор физико-математических наук, МФТИ, руководитель Лаборатории  
топологических квантовых явлений в сверхпроводящих системах,  
Московская область, г. Долгопрудный

**Зубко Василий Васильевич**

доктор технических наук, главный научный сотрудник ВНИИКП, г.  
Подольск

Защита диссертации состоится « » \_\_\_\_\_ 202\_ г. в \_\_\_\_\_.00 на заседании  
Диссертационного \_\_\_\_\_ совета \_\_\_\_\_ при  
\_\_\_\_\_ по адресу: \_\_\_\_\_

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте:

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном  
экземпляре, заверенном печатью организации

Ученый секретарь

диссертационного совета \_\_\_\_\_

Доктор физико-математических наук,  
профессор

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

Масштабное развитие нового класса оборудования для нужд прикладной физики, электроэнергетики и медицины, включающего магнитные системы с сильными магнитными полями, ограничители тока короткого замыкания, кабели постоянного и переменного тока, генераторы, двигатели, трансформаторы, томографы и др., требует создания нового класса сверхпроводящих (СП) материалов, способных значительно повысить их токонесущие и прочностные характеристики. Увеличение значения этих характеристик позволит обеспечить значительное повышение мощности единичного агрегата, снижение потерь на передачу электроэнергии, а также значительно снизить его массу и габариты.

Наиболее перспективными техническими сверхпроводниками для решения подобных задач являются:

- композитные низкотемпературные сверхпроводящие (НТСП) проводники [1], созданные различными методами на основе сплава NbTi [2] и интерметаллида Nb<sub>3</sub>Sn [3];
- высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) ленты 2-го поколения, созданные на основе (Re)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, где Re – редкоземельный элемент типа Gd, Y, Eu и др. [4].

При этом необходимо учитывать, что структура обоих типов СП материалов является достаточно сложной, что приводит к сильной анизотропии свойств (критической плотности тока, температуры необратимости, поля необратимости, энергии активации и др.), из-за которой значительно усложняются анализ и интерпретация результатов экспериментальных исследований, а также выработка рекомендаций по технологии производства материалов.

Исследование критических плотностей тока и полей необратимости новых технических сверхпроводников – актуальная задача текущего

времени. Так в ВТСП лентах 2-го поколения поле необратимости –  $B_{irr}$  является основополагающим параметром, определяющим поведение вихревой структуры. Линия необратимости делит фазовую диаграмму сверхпроводника  $B$ - $T$  на две части: обратимую ( $B > B_{irr}$ ) и необратимую ( $B < B_{irr}$ ). Обратимая часть фазовой диаграммы соответствует состоянию вихревой жидкости. При этом протекание транспортного тока сопровождается движением вихревой структуры, и, как следствие, возникает ненулевое сопротивление. Необратимая часть соответствует жёсткому пиннингу вихревой решетки, при этом протекание тока происходит без потерь. Таким образом, для повышения токонесущей способности ВТСП лент 2-го поколения необходимо смещение линии необратимости в сторону больших значений  $B$ - $T$ , что может быть достигнуто введением дополнительных центров пиннинга – искусственных центров пиннинга (ИЦП) в СП.

Для описания наблюдаемых особенностей транспортных и магнитных характеристик требуется создание новых подходов в изучении наблюдаемых экспериментальных явлений и методик измерений, которые учитывают изменение сверхпроводящих свойств НТСП и ВТСП материалов за счет изменения их состава или за счет внедрения искусственных центров пиннинга различного типа [5]. Размеры включений, на которых происходит закрепление вихревой решетки составляют несколько нанометров.

Помимо этого, важными вопросами в изучении композитных СП являются развитие методов исследования и последующая интерпретация полученных результатов. Одним из возможных методов исследования сложных СП структур является метод численного моделирования, который наиболее близок к эксперименту и который может быть также использован для его описания. Анализ поведения параметра порядка и протекания критического тока в композитных СП проводится, как правило, с использованием одной из наиболее адекватных теоретических моделей – в приближении временных уравнений Гинзбурга-Ландау [6]. Использование данной модели с фундаментальной точки зрения дает возможность приблизиться к пониманию механизмов сверхпроводимости

в сложных структурах, а с технологической точки зрения позволяет снизить затраты на разработку композитных СП и уменьшить количество технологических ошибок с целью повышения выхода годного продукта.

При создании устройств на основе СП и реализации их важных преимуществ: повышения критической плотности тока и увеличения мощности при одновременном снижении характеристик по их массе и габаритам, необходимо проводить целый комплекс как расчетно-теоретических, так и экспериментальных исследований. В кабелях переменного и постоянного тока на основе ВТСП и в обмотках токоограничителей при помощи аналитических и численных расчетов можно получать оптимизированные конфигурации, которые позволяют свести к минимуму воздействие собственных магнитных полей на токонесущие элементы и снизить потери в них на один или даже на два порядка.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что сравнительное исследование критических плотностей тока и полей необратимости необходимо, как для понимания фундаментальных свойств поведения вихревой решетки, так и для повышения сверхпроводящих характеристик исследуемых СП элементов. Эти СП элементы в настоящее время интенсивно внедряются при создании различных устройств для нужд электроэнергетики, сверхпроводящих магнитных систем ускорительной техники, установок термоядерного синтеза, а также ряда других устройств на базе СП. В этой связи работа является актуальной, решающей важные задачи передового края фундаментальной науки и техники.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является определение особенностей сверхпроводящих характеристик новых композитных НТСП и ВТСП материалов, для повышения их токонесущей способности и установление закономерностей при изменении транспортных и магнитных характеристик за счет введения ИЦП различного типа, включая

сопоставление полученных экспериментальных результатов с данными микроструктурного и рентгенографического анализа для требований практических применений используя комплексный подход.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Исследованы токонесущие способности перспективного НТСП интерметаллида со структурой типа А-15.

2. Исследовано влияние облучения быстрыми протонами с различными энергиями и флюенсами на сверхпроводящие свойства (критическая плотность тока, критическая температура, верхнее критическое поле) перспективного НТСП интерметаллида типа А-15.

3. Проведены комплексные исследования сверхпроводящих свойств и микроструктуры перспективных ВТСП лент 2-го поколения с ИЦП на основе  $\text{BaSnO}_3$  и  $\text{BaZrO}_3$ .

4. Исследованы изменения сверхпроводящих характеристик при изменении процентного содержания редкоземельного элемента в ВТСП лентах 2-го поколения и влияние стехиометрического состава на пиннинг вихревой структуры, включая влияние на температуру сверхпроводящего перехода и критическую плотность тока.

5. Исследовано влияние облучения высокоэнергичными ионами с различными флюенсами и энергиями на сверхпроводящие характеристики (критическая температура сверхпроводящего перехода, температура необратимости, энергия активации, поля необратимости и др.) ВТСП лент 2-го поколения.

6. Рассчитаны необходимые параметры ВТСП лент 2-го поколения для использования в устройствах постоянного и переменного тока, включая моделирование потерь в ВТСП кабелях и других СП устройствах.

## **Научная новизна**

В ходе выполнения диссертационной работы впервые были получены следующие результаты:

- исследованы сверхпроводящие свойства до и после облучения быстрыми протонами перспективного сверхпроводящего провода на основе интерметаллида  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  со структурой типа A-15, произведенного по различной технологии. Экспериментально обнаружены значения флюенсов, при которых происходит рост критической плотности тока. Определены диапазоны температур и магнитных полей, при которых пиннинг вихревой структуры за счет облучения является наиболее эффективным;
- установлены общие закономерности в поведении параметра решетки, сверхпроводящего параметра порядка и числа смещений на атом в образцах  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , облученных протонами энергией 12 МэВ;
- с помощью апробированной методики измерений впервые проведены комплексные исследования ВТСП лент 2-го поколения, произведенных по промышленной технологии с различной концентрацией ИЦП. Установлены закономерности в изменении анизотропии критической плотности тока и критической температуры сверхпроводящего перехода при изменении их концентрации, размеров и расстояний между ИЦП типа  $\text{BaSnO}_3$  и  $\text{BaZrO}_3$ ;
- проведены систематические исследования и получены обобщенные экспериментальные данные, описывающие поведение транспортных и магнитных характеристик ВТСП лент 2-го поколения при изменении процентного содержания редкоземельного элемента;
- изучены эффекты влияния радиационного облучения на микроструктуру промышленных ВТСП лент 2-го поколения. При облучении ионами Хе различной энергии в диапазоне от 0,13 до 0,76 МэВ/нуклон обнаружены непрерывные или прерывистые треки с неупорядоченной структурой, которые являются эффективными центрами пиннинга, позволяющими

двукратно повысить токонесущую способность ВТСП лент 2-го поколения в сильных магнитных полях при температурах от 77 до 4,2К.

## **Практическая ценность работы**

Представленные результаты диссертационной работы расширяют представления о транспортных и магнитных характеристиках перспективных сверхпроводящих материалов с ИЦП различного типа, являются основой для работ, ставящих своей целью изучение поведения вихревой структуры, влияние дефектов на протекание транспортного тока и ряда практических задач.

Данные по влиянию облучения протонами на критический ток НТСП проводников могут быть использованы в НИЦ КИ, ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, ФИАН, ОИВТ РАН, ООО «С-Инновации» и др. для создания сверхпроводящих материалов с повышенными транспортными характеристиками.

Результаты исследования радиационных воздействий на сверхпроводящие материалы могут быть применены в НИЦ КИ и предприятиях Росатома для прогнозирования срока службы сверхпроводящих магнитных систем (СМС) на базе сверхпроводников, используемых на практике, и оценки радиационной стойкости сверхпроводящих магнитных систем, работающих в сильных радиационных полях (токамак Т-15МД, CERN, ITER, источники синхротронного излучения).

## **Объекты и методология исследования**

В качестве объектов исследования были использованы современные сверхпроводящие материалы, обладающие уникальными характеристиками. В первой части работы проводились исследования НТСП интерметаллида со структурой типа А-15. С практической точки зрения этот материал обладает как высокими значениями критической

плотности тока, так и высокой устойчивостью к радиационным воздействиям, что является важным аспектом в практическом применении для установок термоядерного синтеза и ускорительной техники. Во второй части работы в качестве объектов исследований использовались ВТСП ленты 2-го поколения, полученные промышленным методом и разработанные при непосредственном участии автора. Уникальность этих материалов заключается в том, что сверхпроводимость в них реализуется в тонком сверхпроводящем слое толщиной от 0,1 до 2 мкм, микроструктуру которого можно варьировать за счет изменения параметров установки для нанесения покрытий. Это важный момент для экспериментальной оптимизации по критическому СП току, поскольку его значение определяется не только структурой, но и в большей степени микроструктурой (морфологией) образцов. Этот аспект работы открывает широкие возможности в получении экспериментальных результатов, их повторяемости и интерпретации.

### **Научно/Народнохозяйственная проблема, решенная в диссертации**

- впервые в мире представлен обобщенный подход к разработке и созданию сверхпроводников с искусственными центрами пиннинга;
- теоретически и экспериментально разработаны методики, позволяющие увеличить критический ток сверхпроводников;
- результаты диссертационной работы позволяют создавать подвижные объекты с более выгодными параметрами по массе и габаритам.

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

1. Экспериментальные результаты по положительному влиянию искусственных центров пиннинга на основе BSO и BZO на транспортные и магнитные характеристики промышленных ВТСП лент 2-го поколения, включая результаты по улучшению пиннинга вихревой структуры при

изменении стехиометрии и варьирования редкоземельного элемента. Важно, что указанные изменения могут быть внедрены и осуществляться непосредственно на стадии промышленного производства ВТСП лент с целью повышения токонесущей способности и использования их для требования конкретных применений при создании сверхпроводящих магнитных систем с сильным полем для электроэнергетики, медицины, авиастроения и прикладных исследований.

2. Дозированное облучение протонами с энергией до 32 МэВ композитных проводов НТСП на основе интерметаллидов, приводит к увеличению токонесущей способности до 15% без значительного снижения критической температуры. Увеличение токонесущей способности связано с контролируемым образованием новых дефектов матрицы сверхпроводника: каскадов ионных треков, кластеров вакансий и междоузлий, размером порядка длины когерентности и заданной плотности. Важно, что дозированное облучение позволяет создавать искусственные центры пиннинга в промышленно изготовленных НТСП материалах, а также распространяется на ВТСП, в том числе и при разном типе облучений.

3. Дозированная имплантация тяжелыми ионами с задаваемой энергией композитных ВТСП лент 2-го поколения приводит к увеличению токонесущей способности на 50% в нулевом магнитном поле и до 300% во внешнем магнитном поле. Увеличение токонесущей способности связано с контролируемым образованием новых дефектов разных типов в зависимости от имплантируемых атомов: для золота и никеля преобладают точечные дефекты размером порядка длины когерентности, для ксенона и висмута ионные треки определенной концентрации, зависящей от дозы облучения. Важно, что такая имплантация может быть внедрена и осуществляться на завершающей стадии промышленного производства ВТСП лент, которые могут быть использованы в качестве токонесущих компонентов при создании установок термоядерного синтеза и ускорителей высоких энергий.

4. Моделирование альтернативного подхода к увеличению токонесущей способности трехфазных ВТСП кабелей за счет увеличения

концентрации редкоземельного элемента и изменения толщины подложки в ВТСП лентах 2-го поколения, показало значительное снижение потерь на фоне увеличения критической плотности тока по отношению к кабелям на основе этих лент со стехиометрическим составом и стандартной подложкой из сплава Хастеллой.

### **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации оригинальные результаты и положения, получены лично автором, либо под его непосредственным руководством. Автором лично поставлены и сформулированы большинство задач исследований. Автор занимался руководством, координацией и постановкой конкретных научных задач, проводил экспериментальные исследования, анализ большого объема экспериментальных данных, выполнял численные расчеты и предлагал физическую интерпретацию полученных результатов. Вклад автора отражен в опубликованных работах. Подготовка к публикации полученных результатов исследований проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Достоверность полученных результатов в диссертации, обеспечивается применением современных методик прямых и бесконтактных измерений в сильных магнитных полях. Полученные результаты измерений на образцах хорошо коррелируют с литературными данными ведущих специалистов, работающих в области сверхпроводимости, являются многократно повторяемыми и подтверждаются успешными испытаниями быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов для ускорителей и ВТСП кабелей для электроэнергетики, созданных с использованием предложенных в диссертации моделей. Расчетные данные согласуются, как с

экспериментальными данными, так и с данными других авторов, известными из литературы.

**Основные результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и совещаниях:**

12-й, 13-й, 15-й международных конференциях «Conferences on Coated conductors for application» (Хайдельберг, 2012 г.; Чечжу, 2014 г.; Вена, 2018 г.); 2-й и 3-й национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (Москва, 2013 год);

5-й Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (Малаховка, 2015 г.);

2-й и 8-й Международной конференции «Плазменные, лазерные исследования и технологии» (Москва, 2016 г.);

25-й 27-й международной конференции «International conference on Magnet Technology» (Амстердам, 2017 г.; Ванкувер, 2019 г.);

12-й, 13-й, 14-й и 15-й Европейской конференции по прикладной сверхпроводимости (Лион, 2015 г.; Женева, 2017 г.; Глазго, 2019 г.; Москва, 2021 г.);

конференции по прикладной сверхпроводимости (Денвер, 2016 г.; Сиэтл, 2018 г.; США, 2020 г.);

международной конференции по сверхпроводимости и магнетизму (Олюдениз, Фетхи, Турция, 2023 г., 2024 г.).

По результатам диссертационной работы получено 4 патента и 5 ноу-хау.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 25 статей в рецензируемых журналах, из списка включенных в ВАК РФ и в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий для публикации результатов

диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и 78 тезисов докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Структура диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем составляет 273 страниц, включая 134 рисунка и 11 таблиц, список цитированной литературы из 180 наименований. Сформулирована научно-техническая проблема, решаемая в работе.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** кратко обосновывается актуальность работы, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, перечислены положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна, достоверность и практическая значимость результатов, личный вклад автора, апробация работы и содержание по главам.

В **Первой главе** приводится современное состояние исследований по проблеме особенностей электродинамики в НТСП и ВТСП. Проведен обзор современных композитных НТСП материалов. Описана технология создания проводников на базе NbTi и интерметаллида Nb<sub>3</sub>Sn с высокой токонесущей способностью, которой предшествовала большая работа по исследованию сверхпроводящих характеристик широкого спектра материалов. Данные технологии позволили разработать СП материалы для адронного коллайдера (CERN) и международного термоядерного реактора (ITER). Работы по созданию и исследованию особенностей сверхпроводящих свойств НТСП позволили расширить существующие модели, описывающие их электродинамику, усовершенствовать их технологию производства и снизить потери на переменном токе. Открытие в 1987 году ВТСП привело к дальнейшему развитию практического применения сверхпроводимости. Были разработаны две существенно разные технологии производства ВТСП проводников. Это так называемые ВТСП ленты 1-го и 2-го поколения. В первом случае –

это технология «порошок в трубе», где сверхпроводящие жилы на основе керамики  $\text{Bi}_2\text{2223}$  размещены в матрице на основе серебра. Такие сверхпроводники обладают низкими значениями критической плотности тока в сравнении с ВТСП лентами 2-го поколения. Во втором случае была разработана технология производства ВТСП лент 2-го поколения, представляющие тонкий слой сверхпроводника на основе керамики  $(\text{Re})\text{BaCuO}$  нанесенный на буферные слои размещенных на металлической ленте-подложке из сплава  $\text{Ni}$ .

В заключении к главе представлены основные выводы по анализу литературных данных, показавшие, что на сегодняшний день не существует обобщенных моделей, четко описывающих поведение электродинамических особенностей в зависимости от типа дефектов в обоих типах сверхпроводников. Для описания полевой зависимости силы пиннинга ВТСП проводников требуется введение универсальной аналитической функции, позволяющей проводить описание как для случая слабых, так и для случая сильных магнитных полей. Ионное облучение приводит к изменению типа пиннинга вихревой решетки за счет образования радиационных дефектов, исследования которых необходимо проводить при помощи методов рентгеноструктурного анализа и микроскопии. Сопоставление результатов анализа экспериментальных исследований температуры сверхпроводящего перехода, критической плотности тока, в том числе и в магнитных полях с данными микроструктуры также позволит развить подходы в изучение ВТСП материалов со структурой типа  $\text{A-15}$ . Это, в свою очередь, будет являться важным фактором при расчете ресурса сверхпроводящих магнитных систем для установок термоядерного синтеза, ускорителей и других типов мегаустановок для прикладных и исследовательских целей.

Исследование сверхпроводящих характеристик ВТСП лент 2-го поколения в настоящее время вышло на новый качественный уровень. Благодаря развитию технологии производства и получению пленок с высоким качеством структуры, а также развитию экспериментального оборудования, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции стало возможным провести исследования на новом

качественном уровне. Это позволяет провести уточнение некоторых вопросов пиннинга вихревой в системах с различным типом дефектов, развить существующие экспериментальные подходы в изучении облученных ВТСП лент 2-го поколения в широком диапазоне энергий от нескольких до сотен МэВ, а также разработать пути совершенствования технологии производства ВТСП лент 2-го поколения с повышенной токонесящей способностью при одновременном снижении стоимости за кА-м.

Во **Второй главе** проведен обзор основных методов экспериментальных измерений, используемых в диссертации. Описаны бесконтактные и контактные методики измерения критической плотности тока, критической температуры, зависимости сопротивления от температуры  $\rho(T)$  в том числе в магнитных полях величиной до 9 Тл.

На основе обзора основных методов измерений был выбран способ измерений при помощи установки измерения физических свойств материалов – PPMS (Quantum Design). Эта установка позволяет проводить физические исследования характеристик материалов в широком температурном диапазоне от 4,2 до 400 К, а также в широком диапазоне внешних магнитных полей от -9 до +9 Тл.

Микроструктурные исследования проводились на просвечивающем растровом электронном микроскопе (П(Р)ЭМ) Titan 80-300 (FEI, USA), снабжённом корректором сферической абберации пробы (Cs-корректор), рентгеновским спектрометром (EDAX) и анализатором характеристических потерь энергий электронов (Gatan) в режимах светлого и темного полей в режимах просвечивающей и просвечивающей растровой электронной микроскопии (TEM и STEM, соответственно). Для расчета полученных электронограмм и изображений использовалось программное обеспечение JEMS, разработанное П. Стадельманом. Поперечные срезы образцов для исследований были приготовлены с помощью сфокусированного пучка ионов Ga<sup>+</sup> в сканирующем электронно-ионном микроскопе DualBeam Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope system (СЭМ) Helios Nanolab 600i (FEI), снабжённым газовыми инжекционными системами (ГИС) Pt, W, C и

микроманипулятором Omniprobe 200. Для получения планарных срезов образцов использовался сканирующий электронно-ионный микроскоп Versa 3D DualBeam в режиме высокого вакуума, снабженный Pt и W ГИС, а также микроманипулятором EasyLift. Рентгеноструктурный анализ образцов проводился на дифрактометре Rigaku SamrtLab с вращающимся медным анодом.

В **Третьей главе** изложены результаты по исследованию сверхпроводящих свойств и морфологии перспективных проводов интерметаллида  $Nb_3Sn$ , а также образцов пластинок до и после облучения высокоэнергетичными протонами с энергией до 32 МэВ в широком диапазоне флюенсов позволили.

Проведенные всесторонние исследования сверхпроводящих свойств и морфологии перспективных проводов интерметаллида  $Nb_3Sn$ , а также образцов пластинок до и после облучения высокоэнергетичными протонами с энергией 32 МэВ в широком диапазоне флюенсов, которые позволили развить существующие подходы в экспериментальных исследованиях НТСП материалов различного формфактора. Исследования проводились на четырех образцах, произведенных по различной технологии. Список образцов, характеристики и технологии производства представлены в Таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики исследуемых проводов  $Nb_3Sn$

| Технология, производитель и порядковый номер образца                | Диаметр / длина, мм | Число жил |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------|
| Порошок в трубе, Брукер, №0802                                      | 0,70/3              | 114       |
| Внутренний источник олова с Та барьером, Алстом, №7419              | 0,80/3              | 54        |
| Внутренний источник олова, Алстом, №63468                           | 1,08/3              | 245       |
| Бронзовая технология, «Оксфорд инструменты-сверхпроводники», №11976 | 0,80/3              | 108       |

По результатам исследования облученных образцов был обнаружен рост критической плотности тока при небольших флюенсах облучения (Рисунок 3). Критическая плотность тока достигает максимума при флюенсе облучения  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  в области низких магнитных полей (до 3 Тл включительно), а при флюенсе облучения  $\phi_0 t = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  – в области сильных магнитных полей (более 3 Тл). После достижения максимума происходит уменьшение плотности критического тока, которая снижается для всех образцов ниже исходной при флюенсе облучения  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . По всей видимости, одним из объяснений такого поведения плотности критического тока может быть изменение механизма пиннинга за счет образования радиационных дефектов, что подтверждается смещением максимума нормированной силы пиннинга в область сильных магнитных полей (Рисунок 4). Плотность критического тока возрастает примерно в полтора раза и происходит в

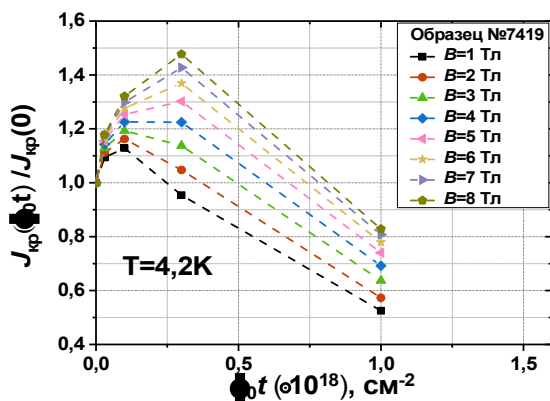


Рисунок 3 – Зависимость плотности критического тока образцов  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  №7419 от флюенса протонов энергией 32 МэВ в поле от 1 до 8 Тл при температуре 4,2К

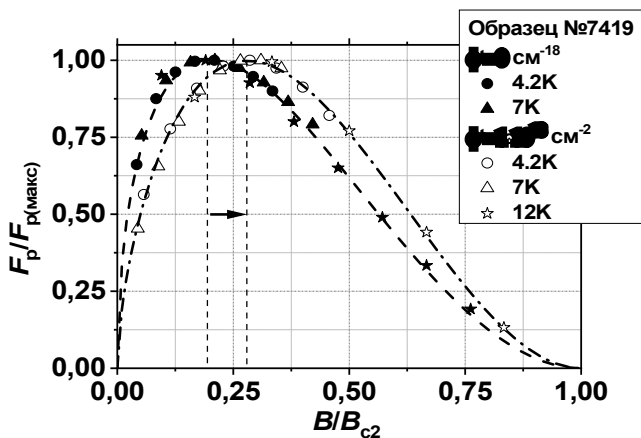


Рисунок 4 – Сопоставление результатов оценки нормированной силы пининга образца сверхпроводящего провода на основе интерметаллида  $Nb_3Sn$  №7419 при температурах 4,2, 7К и 12 К до и после облучения быстрыми протонами энергией 32 МэВ и флюенсом  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

области флюенсов, при которых критическая температура практически не меняется, что указывает на различный тип радиационных дефектов, влияющих на эти величины. Критическая температура сверхпроводящего перехода деградирует с ростом флюенса быстрых протонов, что свидетельствует о снижении электронной плотности состояний вблизи поверхности Ферми (см. Рисунок 5). Эти результаты хорошо согласуются и дополняют результаты работ по облучению протонами с энергиями 65 МэВ и 24 МэВ и использованы для расчета радиационного ресурса сверхпроводящих магнитных систем ускорительной техники и будущих термоядерных реакторов.

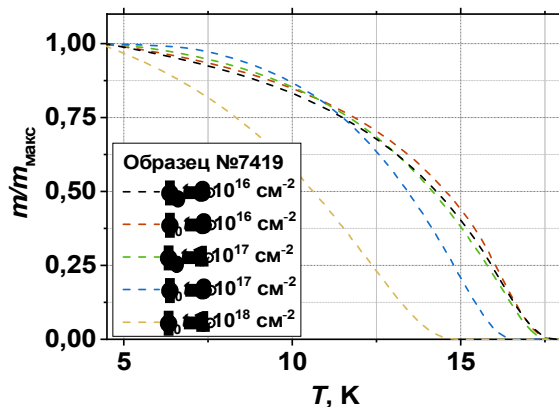


Рисунок 5 – Температурная зависимость нормированного значения остаточного магнитного момента образца  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  №7419

Экспериментальные исследования магнитных характеристик и анализ микроструктуры тонких пластинок  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  различной толщины после облучения быстрыми протонами с плотностью потока  $5 \cdot 10^{17}$  (энергия 12,4 МэВ) и  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (энергия 12,8 МэВ) приводит к образованию неоднородной структуры с выделением нановключений и образования микронапряжений. При помощи ПЭМ было обнаружено тонкие случайно ориентированные области, обогащенные Nb размером 0,1-0,5 мкм (Рисунок 6). Наблюдаемые структурные превращения образца приводят к снижению плотности критического тока и температуры сверхпроводящего перехода (Рисунок 7).

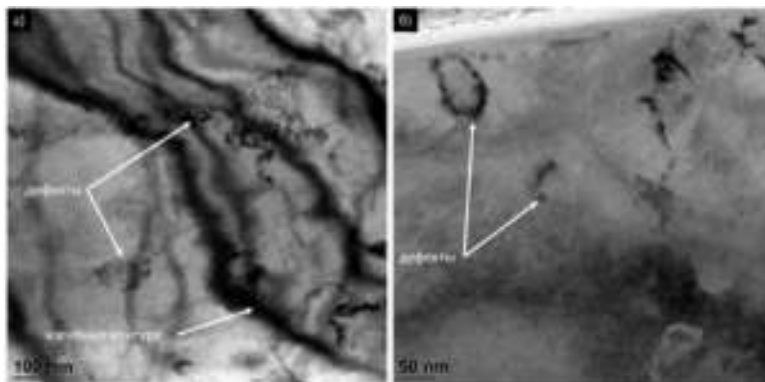


Рисунок 6 – Микроструктура облученного образца пластины  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  толщиной 0,16 см (флюенс  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) при увеличениях: (а) 100 нм; б) 50 нм

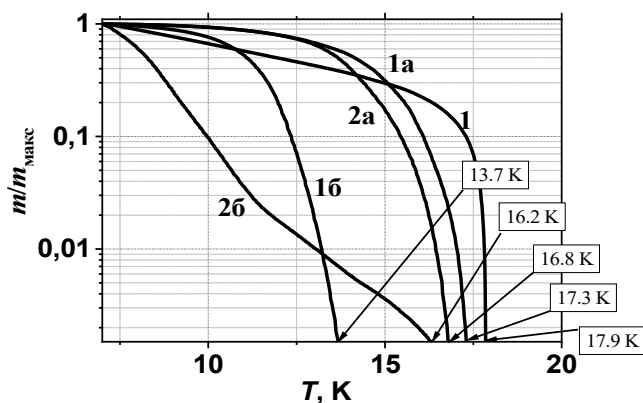


Рисунок 7 – Температурная зависимость приведенной релаксации остаточного магнитного момента образцов (1 – пластина толщиной 0,19 мм до облучения; 1а и 2а – пластины толщиной 0,17 и 0,14 мм соответственно, облученные энергией 12,4 МэВ с флюенсом  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ; 16 и 2б – пластины толщиной 0,22 и 0,16 мм соответственно, облученные энергией 12,8 МэВ с флюенсом  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ )

**Четвертая** глава посвящена результатам экспериментального исследования высокотемпературных сверхпроводящих композитов с дефектами различного типа, полученных, как непосредственно на этапе

роста, так и в процессе облучения ионами различной энергии и фолуенса.

Представлены результаты систематических исследований образцов провода перспективных ВТСП лент 2-го поколения производства компаний Суперпауэр и С-Инновации. Выбор образцов этих производителей проводов обусловлен тем фактом, что они отличаются технологией производства сверхпроводящей пленки, наличием или отсутствием искусственных центров пиннинга (ИЦП) полученных на этапе роста СП пленки, а также образцов облученных высокоэнергитичными ионами. Характеристики проводов представлены в Таблице 2. Образцы производства компании СуперПауэр произведены по технологии IBAD-MOCVD с и без ИЦП на основе  $\text{BaZrO}_3$ , а образцы производства компании С-Инновации произведены по технологии IBAD-PLD с и без ИЦП, а также с изменением по составу как редкоземельного элемента, так и стехиометрии. Схематические изображения ВТСП лент 2-го поколения, произведённые по разным технологиям представлены на Рисунке 8 и Рисунке 9.

В разделе 5.1 представлены результаты по апробации разработанной методики измерения угловой зависимости критического тока в ВТСП лентах 2-го поколения. Измерения ВАХ исходных образцов провода ВТСП лент 2-го поколения в зависимости от угла и величины приложенного внешнего магнитного поля проводилось на установке, представленной на Рисунке 10.

В разделе 5.2 представлены результаты исследований ВТСП лент 2-го поколения производства компании Суперпауэр и С-Инновации с ИЦП. В первой части этого раздела исследованы изменения критического тока и показателя степени ВАХ образцов ВТСП лент 2-го поколения во внешнем магнитном поле величиной до 1 Тл. Ленты произведены по технологии MOCVD. Микроструктурное изображение образцов ВТСП лент 2-го поколения производства компании СуперПауэр с концентрацией ИЦП – 6% представлена на Рисунке 11. Для этих образцов отчётливо наблюдаются колончатые включения типа  $\text{BaZrO}_3$ . Эти включения являются наиболее выраженными центрами пиннинга для вихревой

Electroplating  
**Copper Stabilizer**  
20  $\mu\text{m}$

Sputtering  
**Silver Overlayer**  
2  $\mu\text{m}$

MOCVD  
**(RE)BCO - HTS (epitaxial)**

IBAD/Magnetron Sputtering  
**Buffer Stack**  
~1.6  $\mu\text{m}$

Electroplating  
**Substrate**  
~0.2  $\mu\text{m}$   
50  $\mu\text{m}$   
~1.8  $\mu\text{m}$   
20  $\mu\text{m}$

<0.1 mm

\* not to scale: SC54050

[illegible]

22

Таблица 2 - Характеристики проводов перспективных ВТСП лент 2-го поколения производства компании СуперПауэр и С-Инновации

| № п/п | Производитель | Технология | Состав  | Наличие ИЦП (мол %)     | Критический ток, А/12мм | Критическая температура, К |
|-------|---------------|------------|---------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1     | СуперПауэр    | MOCVD      | 0% Gd   | -                       | 350                     | 91                         |
| 2     | СуперПауэр    | MOCVD      | 0% Gd   | BaZrO <sub>3</sub> (-)  | 400                     | 91                         |
| 3     | С-Инновации   | PLD        | 0% Gd   | BaSnO <sub>3</sub> (6)  | 150                     | 91,5                       |
|       |               |            |         | BaSnO <sub>3</sub> (12) | 83                      | 90,5                       |
|       |               |            |         | BaSnO <sub>3</sub> (18) | 50                      | 89,6                       |
| 4     | С-Инновации   | PLD        | 0% Gd   | BaZrO <sub>3</sub>      |                         | 91,3                       |
| 5     | С-Инновации   | PLD        | 0% Gd   | -                       | 625                     | 93,3                       |
| 6     | С-Инновации   | PLD        | +15% Gd | -                       | 681                     | 93,3                       |
| 7     | С-Инновации   | PLD        | +30% Gd | -                       | 458                     | 91,1                       |
| 8     | С-Инновации   | PLD        | +45% Gd | -                       | 235                     | 92,2                       |
| 9     | С-Инновации   | PLD        | +15% Y  | -                       | 500                     | 88,2                       |

На Рисунке 12 показаны угловые зависимости критического тока ВТСП лент 2-го поколения во внешних магнитных полях от 0,125 Тл до 1 Тл. Отчетливо видно, что кривые имеют два ярко выраженных пика.

При этом отсутствует симметрия, а основной пик не выровнен по оси  $c$ , а отклоняется от нее примерно на  $10^\circ$  градусов.

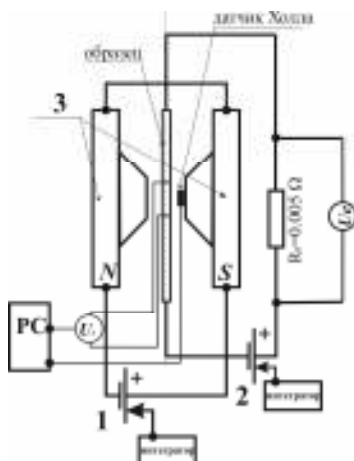


Рисунок 10 – Принципиальная схема установки для измерения критического тока в зависимости от угла и величины внешнего магнитного поля

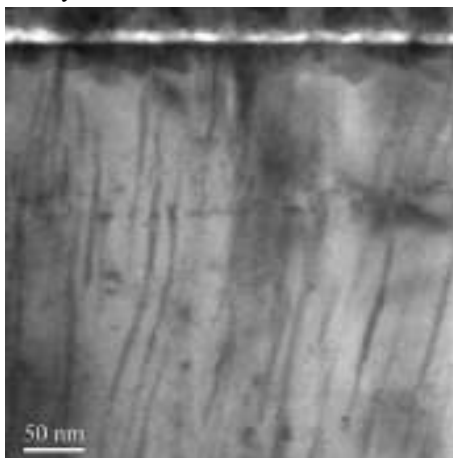


Рисунок 11 – Изображение микроструктуры образца ВТСП ленты 2-го поколения производства компании СуперПауэр с ИЦП

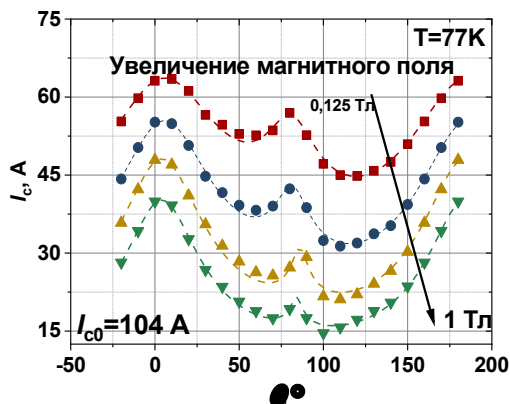


Рисунок 12 – Угловая зависимость критического тока, для образца ВТСП ленты 2-го поколения производства компании SuperPower измеренные при температуре 77K

В этом разделе также представлены результаты исследований образцов ВТСП лент 2-го поколения, полученные на промышленных установках со скоростями нанесения ВТСП плёнки порядка 750 нм/мин, используя метод импульсного лазерного осаждения. Это ВТСП ленты без ИЦП и с двумя типами ИЦП на основе  $\text{BaSnO}_3$  и  $\text{BaZrO}_3$  с концентрацией добавок от 6 до 18 молярных %. Данные XRD анализа представлены на Рисунке 13.

Светлопольные изображения поперечных срезов полной толщины ВТСП-слоя образца провода ВТСП лент 2-го поколения без ИЦП (Рисунок 14 – (а)) и двух образцов с различными типами ИЦП: на основе  $\text{BaSnO}_3$  (Рисунок 14 – (б)) и  $\text{BaZrO}_3$  (Рисунок 14 – (в)) демонстрируют наличие вытянутых вдоль кристаллографической оси-с наноколонн, которые представляют собой включения  $\text{BaSnO}_3$  и  $\text{BaZrO}_3$  в СП матрицу.

Проведённые оценки среднего диаметра и плотности ИЦП в ВТСП лентах 2-го поколения по данным микроструктурных изображений планарных и поперечных срезов образцов с ИЦП типа  $\text{BaSnO}_3$  и  $\text{BaZrO}_3$  с молярным содержанием 6% хорошо коррелирует друг с другом. При этом средний диаметр ИЦП типа BSO составляет порядка 8 нм, а типа

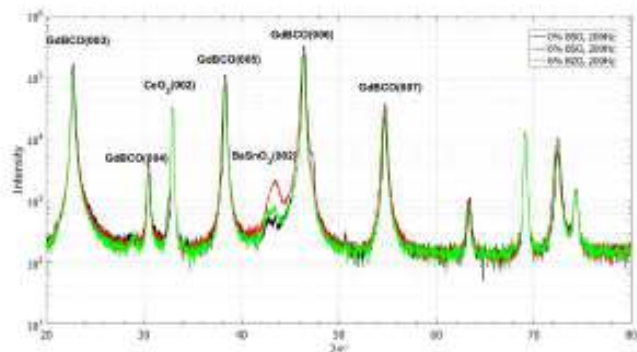


Рисунок 13 – Данные XRD анализа образцов без ИЦП (чёрная кривая), с ИЦП типа BSO (красная кривая) и ИЦП типа BZO (зелёная кривая)



а)



б)

Рисунок 14 – Характерные светлопольные ПЭМ изображения поперечного среза полной толщины ВТСР слоя образцов: (а) без ИЦП, (б) с ИЦП типа BaSnO<sub>3</sub> BZO порядка 6.5 нм. Рассчитанное значение плотности ИЦП составляет 500 мкм<sup>-2</sup> для обоих типов образцов с ИЦП типа BaSnO<sub>3</sub> и BaZrO<sub>3</sub>, что хорошо совпадает со значением концентрации ИЦП. Абсолютное значение критического тока уменьшается при добавлении ИЦП со значения 360 А до 140 А (ИЦП типа BaSnO<sub>3</sub>) и 120 А (ИЦП типа BaZrO<sub>3</sub>), соответственно. Несмотря на это, данные, перестроенные в угловую зависимость лифт фактора, указывают на снижение анизотропии при температурах 77 и 65К. Причём снижение анизотропии для обоих типов

образцов с ИЦП больше при более низких температурах. Для образца с ИЦП типа BSO снижение критической температуры происходит до температуры 91,9К, а для образца с ИЦП типа BaZrO<sub>3</sub> до 91К, наиболее вероятно, объясняемому совокупностью деформации решётки ВТСП при сращивании с имеющими другой параметр элементарной ячейки ИЦП. На перестроенных зависимостях СП перехода в логарифмических координатах обнаружен перегиб, который по всей видимости отвечает за наличие продольных и поперечных центров пиннинга, которое выражается в наличии двух участков на кривой (Рисунок 15). Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение ИЦП приводит к улучшению характеристик анизотропии промышленных ВТСП лент 2-го поколения с ИЦП разного типа.

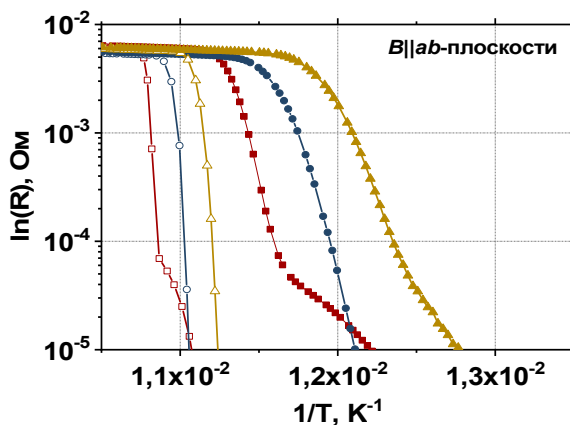


Рисунок 15 – Зависимость  $\ln(R)$  от  $1/T$  для образца без ИЦП (черная линия) и с ИЦП (красная линия – 6% BSO, синяя линия – 6% BZO) в поле  $B||ab$ -плоскости.

Закрытые символы – поле 9 Тл. Открытые символы – поле 1 Тл

В разделе 5.3 представлены результаты исследования влияния ИЦП на температуру необратимости в ВТСП лентах 2-го поколения. Наблюдался пик температуры необратимости  $T_{irr}$  в ориентации  $H||ab$  и определен параметр анизотропии –  $1/\gamma$ , равный примерно  $4,5 \pm 0,3$ , что находится в обычном для ВТСП диапазоне 5-7 (Рисунок 16). Энергия активации, полученная из графиков зависимости  $\log(\rho/\rho_0)$  от  $1/T$ ,

оставалась практически константой во всем угловом диапазоне, с небольшим пиком при  $B \parallel ab$ . При этом энергия активации, как и критическая температура, уменьшались с ростом уровня допирования. Логарифмическая диаграмма удельного сопротивления для недопированного образца выглядела иначе - с перегибом и двумя разными наклонами, соответствующими двум областям с разными значениями энергии активации, что свидетельствует о разном типе пиннинга.

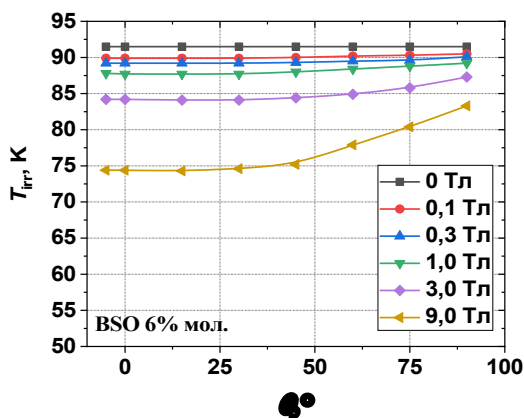


Рисунок 16 – Угловая зависимость температуры необратимости ( $T_{irr}$ ) для исходного образца и для образца концентрацией ИЦП типа BSO 6%,  $0^\circ = B \parallel c$  и  $90^\circ = B \parallel ab$

В разделе 5.4 представлены результаты по влиянию изменения стехиометрического состава на сверхпроводящие свойства в ВТСП лентах 2-го поколения.

Для исследований были отобраны образцы ВТСП лент 2-го поколения, полученные методом импульсного лазерного осаждения с различной стехиометрией по Gd. Это исходный образец и образцы  $Gd_{1.15}Ba_{1.8}Cu_3O_x$ ,  $Gd_{1.3}Ba_{1.8}Cu_3O_x$  and  $Gd_{1.45}Ba_{1.8}Cu_3O_x$  полученные на промышленной установке со скоростью напыления 300 нм/мин. В Таблице 3 представлен список образцов, отобранных для измерений, а

также представлены их сверхпроводящие свойства – критический тока измеренный при помощи прямых измерений при температуре 77К без внешнего магнитного поля, критическая температура сверхпроводящего перехода.

На Рисунках 17 и 18 представлены зависимости лифт фактора образцов от внешнего магнитного поля и зависимость критической температуры от % содержания Gd в СП пленке. Видно, что во внешнем магнитном поле при температуре 77К наибольшее снижение лифт-фактора наблюдается для образца с наибольшей концентрацией по Gd.

Таблица 3 – Сверхпроводящие свойства ВТСП лент 2-го поколения с разным содержанием Gd

| Номер образца | Концентрация Gd, % | $I_c$ , собств. поле, А/12 мм | $T_c$ , К | $B_{\Phi}$ , Т |
|---------------|--------------------|-------------------------------|-----------|----------------|
| 1             | 0                  | 625                           | 93,3      | 0              |
| 2             | 15                 | 681                           | 93,3      | $1,0 \pm 0,2$  |
| 3             | 30                 | 458                           | 91,1      | $1,5 \pm 0,4$  |
| 4             | 45                 | 235                           | 92,2      | $1,3 \pm 0,6$  |

При 65К кривые лифт-фактора для всех типов образцов в поле ведут себя практически одинаково. При 20К видно, что лифт-фактор образца с наибольшим содержанием по Gd лежит выше всех. Отчетливо видно, что увеличение содержания Gd приводит к заметному росту лифт-фактора уже при температуре 77К в поле 1 Тл и увеличивается в 2 раза при температуре 20К при увеличении концентрации по Gd до 45%. Во внешнем магнитном поле равном 8 Т и при температуре 77К рост лифт-фактора отсутствует, но уже при 65К наблюдается тенденция к небольшому росту. С увеличением концентрации Gd критическая температура падает, достигая своего минимального значения при 30% концентрации по Gd и при 45% концентрации по Gd начинается небольшой рост. Ширина перехода при этом увеличивается с

увеличением концентрации по Gd до 30% со значения 0.25 до 1.6K, а затем также падает до 1.5K при 45% концентрации по Gd.

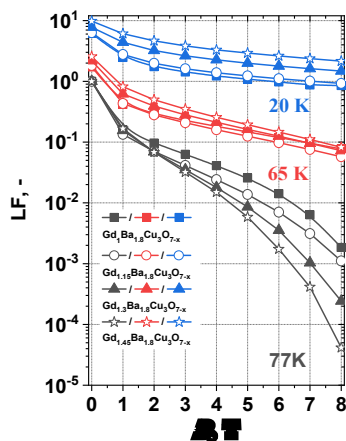


Рисунок 17 – Полевая зависимость лифт-фактора (ЛФ) при 77, 65 и 20K для образцов разным содержанием Gd

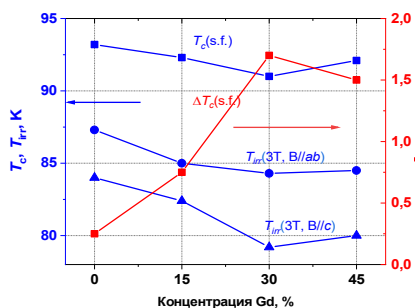


Рисунок 18 – Критическая температура в собственном магнитном поле, температура необратимости при 3 Т при направлениях поля  $B//ab$  и  $B//c$ , а также ширина сверхпроводящего перехода в зависимости от концентрации Gd

В Разделе 5.5 представлены результаты по изменению сверхпроводящих свойств ВТСП лент 2-го поколения, облученных ионами различной энергии. Изучены эффекты влияния на микроструктуру облучение ионами Хе различной энергии в диапазоне от 0.13 до 0.76 МэВ/нуклон, включая исследования влияния внешних магнитных полей величиной до 8 Тл при температурах от 77 до 4.2K на критическую плотность тока. Наблюдались непрерывные или прерывистые треки с неупорядоченной (аморфной) структурой, создаваемых ионами облучения Хе с первичными энергиями 167, 77 и 46

МэВ в слое YBCO толщиной 1 мкм закрытого слоем Ag толщиной 2 мкм. HRTEM показал, что треки ионов являются аморфными (Рисунок 19). Количественный анализ при помощи EDXS подтвердил микроструктуру элементов внутри треков, уменьшают объем сверхпроводящей матрицы и плотность материала с  $6300 \text{ кгм}^{-3}$  для YBCO до  $3600 \text{ кгм}^{-3}$ . Уменьшение сверхпроводящего объема, соответствует неупорядоченной структуре, которая не превышает более 4% от общего объема образца. Треки действуют как центры закрепления вихрей. Увеличение критической плотности тока наблюдается для каждой энергии ионов. Наибольшая критическая плотность тока наблюдается в облученных образцах с самым

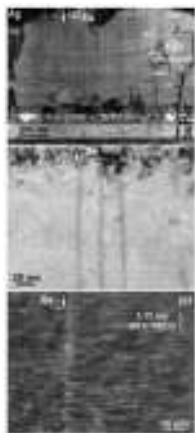


Рисунок 19 – Непрерывные (псевдонепрерывные) треки ионов Хе в облученных образцах энергией 167 МэВ

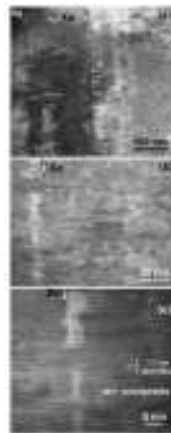


Рисунок 20 – Прерывистые треки ионов Хе в облученных образцах энергией 77 МэВ

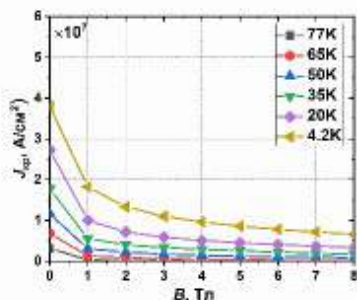


Рисунок 21 – Полевая зависимость критической плотности тока для образца необлученной ВТСП ленты 2-го поколения производства компании СуперПауэр

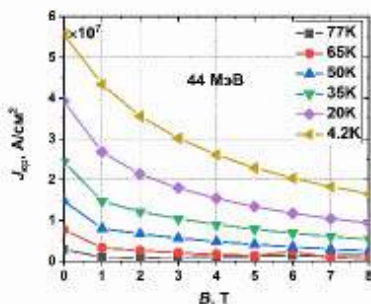


Рисунок 22 – Полевая зависимость критической плотности тока для образца ВТСП ленты 2-го поколения производства компании СуперПауэр, облученного энергией 46 МэВ и флюенсом  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

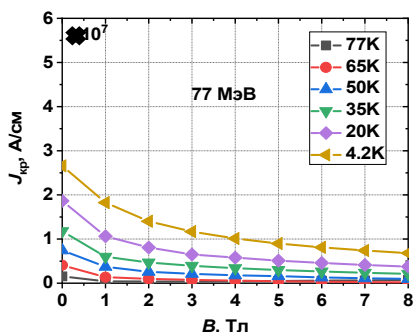


Рисунок 23 – Полевая зависимость критической плотности тока для образца ВТСП ленты 2-го поколения производства компании СуперПауэр, облученного энергией 77 МэВ и флюенсом  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

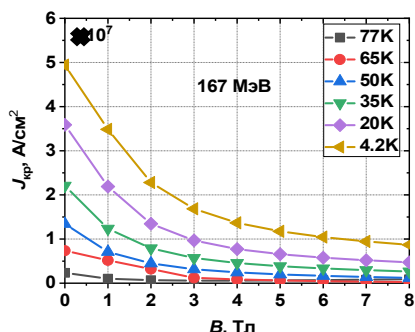


Рисунок 24 – Полевая зависимость критической плотности тока для образца ВТСП ленты 2-го поколения производства компании СуперПауэр, облученного энергией 167 МэВ и флюенсом  $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

низким, что соответствует наибольшему числу центров пиннинга (сфероидальные дефекты) вдоль разрывных треков. Эти многочисленные центры пиннинга приводят к увеличению  $J_c$  при низких и средних магнитных поля –  $56 \text{ MA} \cdot \text{cm}^{-2}$  (0 Т, ионы Хе 46 МэВ) и  $16 \text{ MA} \cdot \text{cm}^{-2}$  (8 Т, ионы Хе 46 МэВ) при 4,2К;  $3 \text{ MA} \cdot \text{cm}^{-2}$  (0 Т, Ионы Хе 46 МэВ) и  $1,6 \text{ MA} \cdot \text{cm}^{-2}$  (8 Т, ионы Хе 46 МэВ) при 77К (Рисунок 21-24). Если рассматривать провода без покрытия YBCO, энергия ионов может быть уменьшен до уровня 17,4 МэВ.

Таким образом, для всех значений энергии радиационные повреждения хорошо наблюдаются, но имеют разную топологию, распределение и размеры. Хорошо известно, что энергия падающих частиц уменьшается по мере внедрения в мишень, за счет упругих (атомных) и неупругих потерь. Оба этих канала потерь способны образовывать повреждения в пленках YBCO.

Результаты по облучению ВТСП лент ионами Вi с энергией 670 МэВ наравне с результатами по облучению ионами Хе также свидетельствуют об образовании аналогичных протяжённых треков. Эти треки являются эффективными центрами пиннинга вихревой структуры, что выражается в росте критического тока при облучении флюенсом  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . На Рисунке 25 и 26 представлены результаты измерения абсолютного значения критического тока для исходного образца и образцов облученных флюенсом  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  и  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

Согласно данным температурной зависимости динамической магнитной восприимчивости, температура сверхпроводящего перехода снижается с увеличением флюенса облучения. Облучение ионами Вi с энергией 670 МэВ и флюенсом  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  приводит к снижению температуры сверхпроводящего перехода на 3К. При флюенсе  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  снижение температуры сверхпроводящего перехода происходит до 77К. По всей видимости облучение с большим флюенсом приводит к полной деградации образца, что также отчетливо видно на температурной зависимости действительной части магнитной восприимчивости и выражается в виде размытие перехода для всех значений внешнего магнитного поля.

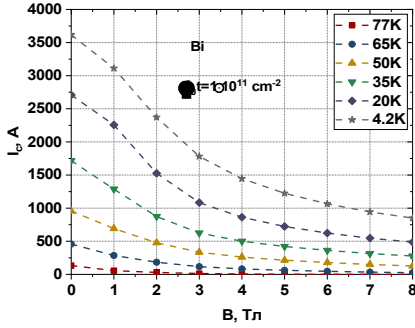


Рисунок 25 – Полевая зависимость критического тока образца ВТСП ленты 2-го поколения на основе YBCO облученного ионами Bi с энергией 670 МэВ и флюенсом  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  в полях до 8 Тл и при температурах от 77 до 4,2К

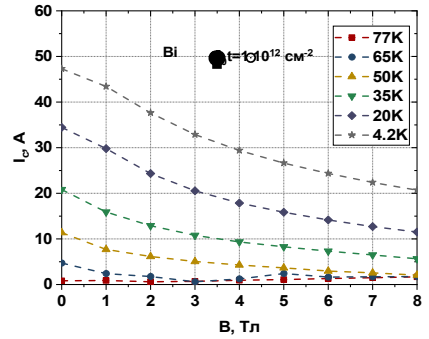


Рисунок 26 – Полевая зависимость критического тока необлученного образца ВТСП ленты 2-го поколения на основе YBCO облученного ионами Bi с энергией 670 МэВ и флюенсом  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в полях до 8 Тл и при температурах от 77 до 4,2К

На Рисунке 27 представлена зависимость поля необратимости от  $1 - \left(\frac{T_c}{T}\right)^2$  демонстрирующая изменение пиннинга вихревой структуры в образцах. Анализ этих результатов используя модель Матсушита [161]:

$$B_{irr}(T) = B_{irr}(0) \times \left(\frac{T_c}{T}\right)^p \times \left[1 - \left(\frac{T_c}{T}\right)^2\right]^n,$$

где  $n = \frac{2(m-\gamma)}{3-2\gamma}$  и  $p = \frac{4}{3-2\gamma}$ , продемонстрировал отчетливое наблюдение изменение параметра n облученного ионами Bi образца ВТСП ленты свидетельствующее об образовании несверхпроводящей фазы. Образование этой фазы свидетельствуют о том, что в образце образуются протяженные треки, которые являются эффективными центрами пиннинга.

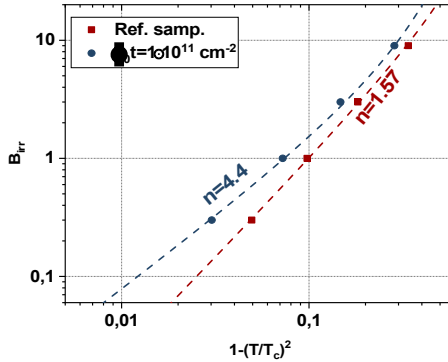


Рисунок 27 – Зависимость поля необратимости ( $B_{irr}$ ) от  $1 - \left(\frac{T_c}{T}\right)^2$  для необлученного и облученного образца ионами  $Vi$  и флюенсом  $\phi_0 t = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  образца ВТСП ленты 2-го поколения

В **Пятой главе** развита методика расчета при помощи численного метода для снижения потерь на переменном токе в 3-х фазных ВТСП кабелях различной конструкции.

Расчеты потерь переменного тока проводились с помощью программы, основанной на методе индуктивно-связанной цепи тока. Для расчета распределения токов ВТСП-материал кабеля разбивается на  $N$  цепей, в которых токи находятся путем интегрирования следующей системы уравнений:

$$\sum_{i=1}^N M_{ik} \frac{dJ_k}{dt} - U^F = 0,$$

где  $M_{ik}$  – взаимная индуктивность цепей  $i$  и  $k$ ,  $J_k$  – ток цепи  $k$ ,  $U^F$  – напряжение фазы, к которой принадлежит цепь  $i$ . Система  $N$  уравнений дополняется дополнительными уравнениями, описывающими текущую зависимость от времени в каждой из фаз.

Гистерезисные потери  $Q_{hi}$  за цикл изменения тока в каждой цепи  $i$  равны:

$$Q_{hi} = V_i \int E_i j_{ci} dt$$

где  $E_i$  и  $j_{ci}$  — соответственно электрическое поле в каждой цепи объемом  $V_i$  и ее плотность тока.

В качестве токонесущих элементов рассматриваемых кабелей используются три следующих конструкции ВТСП-лент: - обычные ВТСП-ленты производства компании «С-Инновации» с ранее полученными критическими характеристиками (ленты с архитектурой 1, Рисунок 28(а); - ленты с измененной конфигурацией (ленты с архитектурой 2). Они имеют единственное отличие от исполнения 1 – в отличие от последнего медное покрытие перенесено со стороны ВТСП на подложку из Хастеллоя; - ВТСП-ленты с повышенными характеристиками, получаемые в настоящее время компанией «С-Инновации» - ленты с архитектурой 3 (Рисунок 28(б)). Поскольку основная цель – это анализ эффекта снижения потерь на переменном токе только за счет вариации конструкций ВТСП лент, остальные существенные характеристики кабелей принимаются одинаковыми: фазный критический ток  $I_c = 5$  кА, толщина межфазной изоляции 4 мм, диаметр кабельного каркаса 24 мм. Приведенные ниже расчеты выполнены для двух типов кабелей: первый — с экранированными фазами, а второй — трехфазный с единым охлаждением.

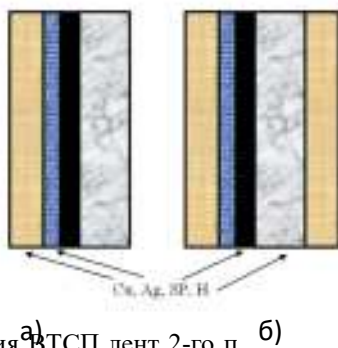


Рисунок 28 – Конфигурация ВТСП лент 2-го поколения с архитектурой. Ширина ленты – 4 мм. Медное покрытие – Cu, серебряное покрытие – Ag, ВТСП слой – SP, Хастеллой – H;  $\delta$  – толщина материала в мкм,  $I_{кр}$  - критический ток ленты при 77К. (а) – лента с архитектурой 1:  $\delta H = 60$  мкм,  $\delta SP = 1,5$  мкм,  $\delta Ag = 2$  мкм,  $\delta Cu = 60$  мкм,  $I_{кр} = 125$  А; (б) – лента с архитектурой 2:  $\delta H = 40$  мкм,  $\delta SP = 2$  мкм,  $\delta Ag = 2/1.5$  мкм (со стороны ВТСП/со стороны

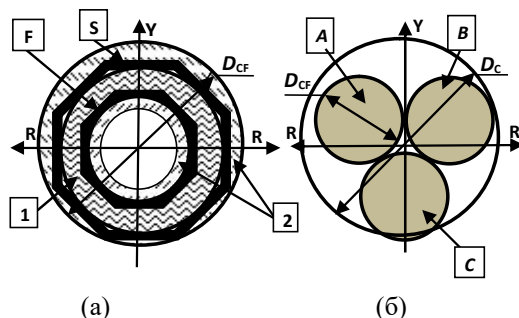


Рисунок 29 – Схематическое изображение трехфазного кабеля с экранированными фазами. (а) – экранированная фаза: F и S – ВТСП слой фазы и экрана, 1 – изоляция, 2 – дополнительное медное покрытие; (б) – схематическая изображение расположения фаз в кабеле: A, B, C – экранированные фазы

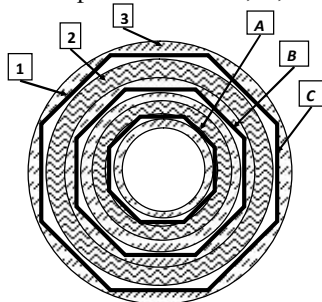


Рисунок 30 – Схематическое изображение триаксиального кабеля. 1- толщина ВТСП слоя, 2 и 3 – слоя изоляции и дополнительной меди. A, B, C – фазы кабеля

Рассмотрены три конструктивных варианта кабелей с экранированными фазами (кабели 1 типа Ph3R-Sh), точные геометрические характеристики которых приведены в Таблице 4: - кабель второго типа содержит два слоя ВТСП лент с архитектурой 1 на фазу и на экран.

Результаты расчетов полных потерь переменного тока  $P_s$  (т. е. суммы гистерезисных потерь в сверхпроводнике Ph и потерь на вихревые токи в несверхпроводящих элементах кабеля  $P_e$ ) показывают замену лент с архитектурой 1 новыми лентами с архитектурой 2 к радикальному

Таблица 4 – Параметры ВТСП кабелей с экранированными фазами.  $D_{CF}$ ,  $D_c$ , – диаметр экранированной фазы и внешний диаметр кабеля (без внешней изоляции);  $n_i$  and  $d_{si}$  – число лент в слое  $i$  фазы или экрана и диаметр этого слоя по сверхпроводнику;  $N$  – полное число ВТСП лент в кабеле. Структура кабеля (от внутренних к внешним слоям):  $F_i$ , и  $S_i$  – слои фаз и экрана ( $i$  – число слоев);  $Cu$  “xx” – толщина дополнительного слоя меди,  $in$  “xx” толщина слоя изоляции

| Тип кабеля                                       | Структура и состав экранированного кабеля      |                                                                                             |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Кабель 1<br>$D_{ST}=38$<br>$D_K=82$<br>$N=282$   | Cu1,5 - $F_1 - F_2 - in4 - S_1 - S_2$ - Cu 1,0 |                                                                                             |
|                                                  | F                                              | Два слоя лент с архитектурой 1: $n_1 = n_2 = 20$ ; $d_{S1}=27,125$ ; $d_{S2}=27,368$        |
|                                                  | S                                              | Два слоя лент с архитектурой 1: $n_1 = 26$ ; $n_2 = 28$ ; $d_{S1}=35,62$ ; $d_{S2}=35,86$ . |
| Кабель 2<br>$D_{ST}=115$<br>$D_K=254$<br>$N=516$ | Cu1,5 - $F_1 - F_2 - in4 - S_1 - S_2$ - Cu 1,0 |                                                                                             |
|                                                  | F                                              | Два слоя лент с архитектурой 3: $n_1 = n_2 = 20$ ; $d_{S1}=27,24$ ; $d_{S2}=27,25$          |
|                                                  | S                                              | Два слоя лент с архитектурой 3: $n_1 = 26$ ; $n_2 = 28$ ; $d_{S1}=35,74$ ; $d_{S2}=35,75$   |
| Кабель 3<br>$D_{ST}=61$<br>$D_K=189$<br>$N=528$  | Cu1,5 - $F_1 - in4 - S_1$ - Cu 1,0             |                                                                                             |
|                                                  | F                                              | Один слой лент с архитектурой 2: $n_1 = 20$ ;<br>$d_{S1}=27,012$                            |
|                                                  | S                                              | Один слой лент с архитектурой 2: $n_1 = 26$ ;<br>$d_{S1}=35,115$                            |

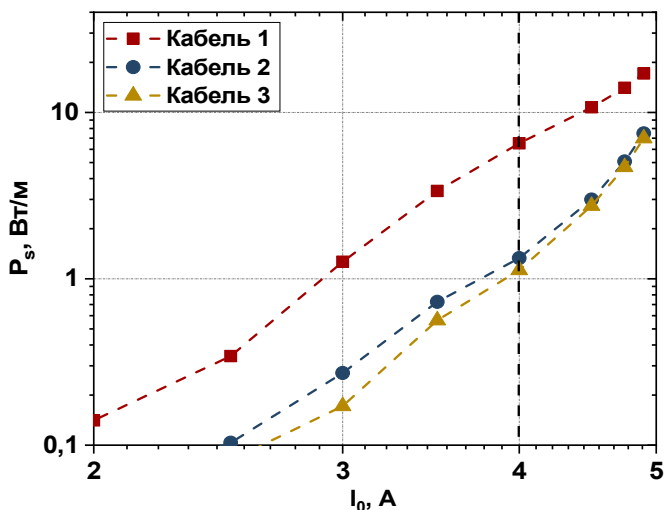


Рисунок 31 – Кабель с экранированными фазами. Полная мощность АС – потеря от амплитуды тока фазы при частоте  $f = 50 \text{ Hz}$ . Прерывистой линией обозначена номинальная амплитуда тока ( $I_{0n}$ )

снижению  $P_s$  (Рисунок 31). Как правило, в качестве номинальной амплитуды тока фазы кабеля принимается значение, равное  $0,8I_c$ . Соответственно, в рассматриваемом случае при амплитуде номинального тока фазы 4 кА потери уменьшаются в 5,8 раза по сравнению с лентами архитектурой 1. Использование лент с архитектурой 3 приводит к близкому, но все же меньшему эффекту. Вклад потерь на вихревые токи в общую сумму потерь для всех рассмотренных вариантов кабеля увеличивается с уменьшением амплитуды тока. Но при амплитудах, представляющих практический интерес, она все же остается не очень существенной – менее 5 % при  $J_0 > 3 \text{ кА}$ .

В триаксиальных кабелях взаимное влияние перпендикулярных составляющих магнитного поля фаз сведено к минимуму за счет их соосного расположения (Рисунок 30). Отсутствие экранов позволяет уменьшить расход ВТСП лент и уменьшить габариты кабеля. Однако

сохраняется необходимость увеличения количества лент во внешних фазах по сравнению с внутренними, поскольку сохраняется требование плотного расположения лент в слоях для минимизации потерь переменного тока. Вызванный этим обстоятельством перерасход лент увеличивается с увеличением толщины межфазной изоляции. Одновременно ухудшаются условия охлаждения средней фазы кабеля.

Для выбора оптимального варианта в каждом конкретном случае необходимы оптимизационные расчеты. Выполненные расчеты для всех типов кабелей позволили оптимизировать их конструкцию и значительно снизить потери на переменном токе. В результате конструкция кабелей изменяется следующим образом. Фазы кабеля 4 содержат по два слоя ВТСП лент с архитектурой 1 на фазу. Ленты обращены друг к другу подложками из Хастеллоя, и, соответственно, расстояние между их сверхпроводящими покрытиями в слоях составляет 120 мкм; - фазы кабеля 5 содержат по два слоя ВТСП лент с архитектурой 3 на фазу. Однако в этом варианте конструкции ленты в слоях обращены друг к другу своими сверхпроводящими покрытиями. В результате расстояние между ними сокращается до 4 мкм; - в кабеле 6 для обеспечения необходимого значения критического тока 5 кА достаточно иметь только один слой лент исполнения t2. Ленты фазового слоя обращены своими ВТСП-слоями к внутреннему периметру этой фазы. Следует, однако, отметить, что в связи с фактически симметричной конструкцией лент с архитектурой 2 изменение этой ориентации на противоположную не оказывает существенного влияния на величину потерь переменного тока (см. Рисунок 32).

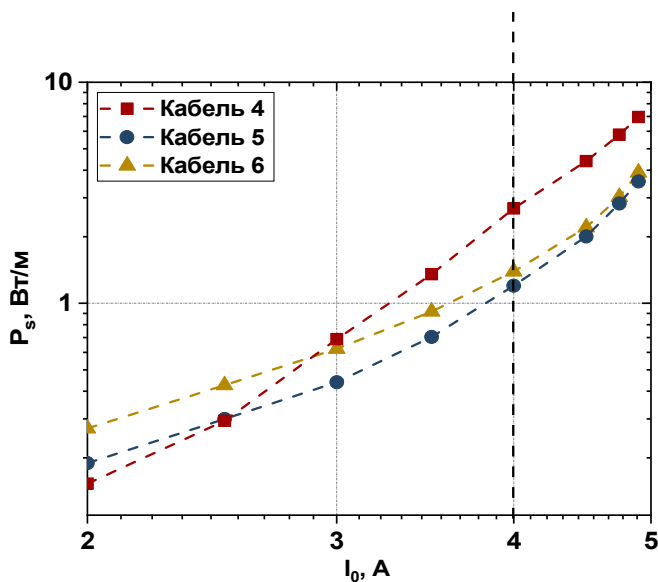


Рисунок 32 – Полная мощность потерь на переменном токе в зависимости от амплитуды тока при частоте  $f = 50\text{Hz}$  для триаксимального кабеля. Прерывистой линией обозначена номинальная амплитуда тока ( $I_{0n}$ )

### Заключение

В работе представлены результаты комплексных исследований композитных сверхпроводников с различными типами дефектов, являющихся эффективными центрами пиннинга, которые направлены на развитие существующих подходов в улучшении токонесущей способности сверхпроводников и последующего их использования для создания различного типа нового оборудования для электротехники, электромеханики, ускорительной техники, установок термоядерного синтеза, а также изделий специального применения.

На основании проведенных в работе исследований сформулированы следующие основные результаты работы.

1. Выполнены экспериментальные исследования композитных НТСП материалов, в рамках которых:

- разработана методика измерений критических параметров сверхпроводников при облучении различного вида. С использованием разработанной методики проведены экспериментальные исследования электрофизических характеристик, а также микроструктурный анализ чистого Nb<sub>3</sub>Sn до и после облучения быстрыми протонами с флюенсом  $\phi t_0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  (с энергией 12,4 МэВ) и  $\phi t_0 = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  (с энергией 12,8 МэВ). Полученные экспериментальные данные позволяют проводить разработку токонесущих элементов с учетом работы в сильных радиационных полях;

- установлены пороговые значения энергии и флюенсов облучения, при которых происходит появление в облученном образце беспорядочно ориентированных областей, насыщенных частицами Nb, при одновременном снижении температуры СП перехода, определены пороговые дозы облучения;

- в образцах перспективных НТСП проводов Nb<sub>3</sub>Sn обнаружен рост критической плотности тока, как при низких флюенсах облучения и достигающий максимума в области низких магнитных полей, так и при высоких значениях флюенса, достигающий максимума в области сильных магнитных полей;

- установлено снижение электронной плотности состояний вблизи поверхности Ферми в интерметаллиде Nb<sub>3</sub>Sn в результате облучения на основе сравнительного анализа поведения критической температуры СП перехода облученных и необлученных образцов.

2. Выполнены экспериментальные исследования критических параметров современных композитных высокотемпературных сверхпроводников на основе ВТСП лент 2-го поколения при введении ИЦП в виде нанодобавок, радиационных дефектов и вариации стехиометрического состава, в результате которых:

- обнаружено снижение температуры сверхпроводящего перехода при введении различного типа ИЦП с одновременным увеличением критической плотности тока и снижением его анизотропии, которое объясняется возникновением напряжений кристаллической решетки из-за несогласованности параметров решеток ВТСП матрицы и решетки ИЦП;

- обнаружены радиационно-созданные треки с прерывистой субкаскадной структурой в ВТСП лентах 2-го поколения, облученных высокоэнергичными ионами, которые являются наиболее эффективными центрами закрепления вихревой решетки;

- установлены общие закономерности в изменении механизма пиннинга вихревой структуры при облучении путем анализа полей необратимости на основе модели Мацуситы в облученных ВТСП лентах 2-го поколения.

3. Предложен оригинальный эффективный метод увеличения критического тока в ВТСП лентах 2-го поколения за счет облучения тяжелыми ионами непосредственно на завершающей стадии промышленного производства.

4. Разработана модель для расчета потерь в 3-х фазных ВТСП кабелях различной конфигурации. На основании предложенной модели и проведенных экспериментальных исследований разработаны ВТСП ленты 2-го поколения с повышенной токонесящей способностью, что позволило снизить энергетические потери в промышленных кабелях.

## **Основные публикации по теме диссертации**

### **A.1 Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК**

A1. Degtyarenko P. N., Ovcharov A. V., Tsvetkov A. Yu., Karateev I. A., Vasiliev A. L., Amelichev V. A., Massalimov B. I., Golovkova E. A. / The Influence of Gadolinium Content in GdBCO Industrial 2G HTS Wires on the Superconducting Properties in Magnetic Field // IEEE Trans. on App. Supercond. – 2025. – Vol. 35. – No. 4. – Art. No. 6604208. – PP. 1-8.

A2. Degtyarenko P., Petrykin V., Okube M., Yoshinaka N., Gaifullin M., Kaneya S., Hanaya H., Okada T., Awaji S. and Lee S. / Enhancement of 2G-HTS wire performance in strong magnetic fields through heavy ion irradiation // Supercond. Sci. and Tech. – 2025. – Vol. 38. – No. 4. – Art. No.045019.

A3. Degtyarenko P., Skuratov V., Semina V., Ovcharov A., Vasiliev A., Malyavina A., Gavrilkin S., Tsvetkov A., Petrzhik A., and Novikov M. / Superconducting Properties of 2G HTS Wires Irradiated by Bi Ions with Energy 670 MeV // Bull. of the Leb. Phys. Inst. – 2024. – Vol. 51. – No. 8, – PP. 284-289.

A4. Дегтяренко П. Н., Скуратов В. А., Васильев А.Л., Овчаров А.В., Петржик А.М., Семина В.К., Гаврилкин С.Ю., Новиков М.С., Малявина А.Ю., Амеличев В.А., Цветков А.Ю. / Влияние облучения ионами Хе с энергией 167 МэВ на сверхпроводящие свойства ВТСП-лент второго поколения // ЖЭТФ. – 2024. – том. 165. – Вып. 6., – Стр. 827-832.

A5. Дегтяренко П.Н., Самсонов И.А., Дергунова Е.А., Каменев А.А. / Сверхпроводящие свойства ВТСП лент 2-го поколения, полученные при различных процессах осаждения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2024. – Vol. 2. No. 123. – С. 48-57.

A6. P. N. Degtyarenko, A. V. Ovcharov, A. L. Vasiliev, V. N. Chepikov, N. N. Balashov and A. Y. Degtyarenko / Investigation of Pinning and Current-Carrying Capacity in 2G HTS Wires with Artificial Pinning Centers Obtained at Various Deposition Rates // IEEE Trans. on App. Supercond. – 2023. – Vol. 33. – No. 9. – pp. 1-6, Art. No. 4802506.

A7. Degtyarenko P. N., Gavrilkin S. Y., Tsvetkov A. Y., Ovcharov A. V., Degtyarenko A. Y. / Investigation of pinning properties in second generation HTS tape irradiated by ions with different energy // Bull. of the RAS. Physics. – 2023. – Vol. 86. – No. 11. – PP. 1-6.

A8. Degtyarenko P., Balashov N., Zheltov V., Arkangelsky A., Buyanov Y., Degtyarenko A. / Additional opportunities of AC losses minimization in HTS cables caused by the enhancement of HTS tapes critical characteristics // IEEE Trans. On Appl. Supercond. – 2022. – Vol. 32. No. 4.

A9. Molodyk A., Samoilencov S., Markelov A., Degtyarenko P., Lee S., Petrykin V., Gaifullin M., Mankevich A., Vavilov A., Sorbom B., Cheng J., Garberg S., Kesler L., Hartwig Z., Gavrilkin S., Tsvetkov A., Okada T., Awaji S., Abraimov D., Francis A., Bradford G., Larbalestier D., Senatore C., Bonura M., Pantoja A. E., Wimbush S. C., Strickland N. M., Vasiliev A. /

Development and large volume production of extremely high current density YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> superconducting wires for fusion // Sci. Rep. – 2021. – Vol. 11. No. 1. – PP. 1-11.

A10. Lipa D., Kopylov S., Zheltov V., Balashov N., Degtyarenko P., Lipa O. / Design optimization of flat HTS three-phase cables // Proceedings – ICOECS 2020. – 2020 – Art. No. 9278409

A11. Arkhangelsky A. Yu., Balashov N. N., Degtyarenko P. N., Kopylov S. I., Zheltov V.V. / Design optimization of high-voltage HTS three-phase cables with screened phases // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1559. – No. 1. – Art. No. 012133.

A12. Elena I. Suvorova, Pavel N. Degtyarenko, Igor A. Karateev, Alexey V. Ovcharov, Alexander L. Vasiliev, Vladimir A. Skuratov, and Philippe A. Buffat / Energy dependent structure of Xe ion tracks in YBCO and the effect on the superconductive properties in magnetic fields // J. Appl. Phys. – 2019. – Vol. 126. – Art. No. 145106.

A13. Sergey Kopylov, Nikolay Balashov, Pavel Degtyarenko, Sergei Ivanov, Sergej Samoilentov, Alexey Soldatenko, Vladimir Zheltov, Vladimir Vysotsky / Investigation of HTS Power Transmission Lines Stability Conditions in Short-Circuit Mode // IEEE Trans. On Appl. Supercond. – 2019. – Vol. 29. – No. 5.

A14. Pavel Degtyarenko, Sergey Gavrilkin, Alexey Tsvetkov, Nikolay Mineev, Igor Rudnev, Alexey Ovcharov, Vsevolod Chepikov, Sergey Lee, Valery Petrykin, Alexander Molodyk / The influence of BaSnO<sub>3</sub> artificial pinning centres on the resistive transition of 2G high-temperature superconductor wire in magnetic field, Supercond. Sci. and Tech. – 2019. – Vol. 33. – No. 4. – Art. No. 045003.

A15. N.N. Balashov, P.N. Degtyarenko, S.S. Ivanov, S.I. Kopylov, D.A. Gorbunova, A.A. Molodyk, S.V. Samoilentov, V.E. Sytnikov, V.V. Zheltov / Low-Resistance Soldered Joints of Commercial 2G HTS Wire Prepared at Various Values of Applied Pressure // IEEE Trans. On Appl. Supercond. – 2018. – Vol. 28. – No. 4.

A16. V. A. Altov, N. N. Balashov, P. N. Degtyarenko, S. S. Ivanov, S. I. Kopylov, D. A. Lipa, S. V. Samoilentov, V. E. Sytnikov, V. V. Zheltov /

Design versions of HTS three-phase cables with the minimized value of AC losses // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 969. – No. 1. Art. No. 012049.

A17. А.Л. Васильев, А. Балларино, Л. Боттура, С.Ю. Гаврилкин, П.Н. Дегтяренко, И.А. Каратеев, В.С. Круглов, С.Т. Латушкин, А.В. Лунев, А.И. Рязанов, Е.В.Семенов, В.Н. Унежев, Р. Флюкегер, С.В. Шавкин / О возможном выделении фазы, обогащённой Nb, в сверхпроводящем интерметаллиде Nb<sub>3</sub>Sn при облучении быстрыми протонами // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2017. – Том. 4, – Стр. 47-53.

A18. А. Балларино, Л. Боттура, С.Ю. Гаврилкин, П.Н. Дегтяренко, В.С. Круглов, С.Т. Латушкин, А.И. Рязанов, Е.В.Семенов, Т. Спино, В.Н. Унежев, Р. Флюкегер, К. Шаурляйн, С.В. Шавкин / Влияние облучения быстрыми протонами с энергией 32 МэВ на критические параметры современных композиционных проводов на основе сверхпроводящего соединения Nb<sub>3</sub>Sn // ПЖТФ. – 2017. – Том. 12. – Стр. 68.

A19. Flükiger R., Spina T., Cerutti F., Ballarino A., Scheuerlein C., Bottura L., Zubavichus Y., Ryazanov A., Svetogorov R., Shavkin S., Degtyarenko P., Semenov Y., Senatore C. and Cerny R. / Variation of T<sub>c</sub>, lattice parameter and atomic ordering in Nb<sub>3</sub>Sn platelets irradiated with 12 MeV protons: correlation with the number of induced Frenkel defects. // Supercond. Sci. and Tech. – 2017. – Vol. 30(5). – Art. No. 054003.

A20. V.A. Altov, N.N. Balashov, P.N. Degtyarenko, S.S. Ivanov, S.I. Kopylov, V.E. Sytnikov, V.V. Zheltov. / Optimization of Three- and Single-Phase AC HTS Cables Design by Numerical Simulation // IEEE Trans. OnAppl. Supercond. – 2017. – Vol. 27. – No. 4.

A20. V. Chepikov, N. Mineev, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, A. Ovcharov, A. Vasiliev, A. Kaul, V. Amelichev, A. Kamenev, A. Molodyk and S. Samoilentov / Introduction of BaSnO<sub>3</sub> and BaZrO<sub>3</sub> artificial pinning centres into 2G HTS wires based on PLD-GdBCO films. Phase I of the industrial R&D programme at SuperOx // Supercond. Sci. and Tech. – 2017. – Vol. 30. No. 5. – Art. No. 124001.

A20. P.N. Degtyarenko, A. Ballarino, L. Bottura, S.Y. Gavrillkin, R. Flukiger, I.A. Karateev, V.S. Kругlov, S.T. Latushkin, C. Scheuerlein., A.I. Rязанов / Influence of fast proton irradiation with energies of 12.4 and 12.8

MeV on magnetic characteristics and microstructure changes of superconducting intermetallic compound Nb<sub>3</sub>Sn // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2016. – Vol. 747. – Art. No. 012030.

A23. V.V Sychugov, P.N. Degtyarenko, A.V. Ovcharov, S.V. Shavkin, V.S. Kruglov, A.L. Vasiliev, P.V. Volkov and Yu. M. Chesnokov / Variation of critical current and n-value of 2G HTS tapes in external magnetic fields of different orientation // J. of Phys.: Conf. Ser. – 2016. – Vol. 747. – Art. No. 012048.

A24. Degtyarenko P.N., Balashov N.N., Ivanov S.S. / Investigation of soldered low-resistance joints for coated conductors // Progress in superconductivity and cryogenics – 2015. – Vol. 17. – No. 1. – PP. 23-27.

A25. Shuvalov D.B., Barkalov K.E. Lymar A.V., Sychugov V.V., Degtyarenko P.N., Shavkin S.V., Kruglov V.S. / Investigation of electro-physical and physical-mechanical properties of HTS 2G tapes // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 71. – PP. 417-422.

## **A.2 ПАТЕНТЫ РФ**

A28. Морозов О.В., Крылов В.Е., Дегтяренко П.Н., Стоякин В.В., Шавкин С.В., Свистунова О.И., Ревазов В.В. / Способ механической полировки стальной ленты-подложки для получения ВТСП-2 // Ноу-хау № 157/2013 от 03.12.2013, приказ № 1779 от 24.12.2013.

A29. Морозов О.В., Крылов В.Е., Дегтяренко П.Н., Стоякин В.В., Шавкин С.В., Свистунова О.И., Ревазов В.В. / Определение оптимального уровня энергии импульса лазерного излучения для нанесения сверхпроводящего слоя в установке импульсного лазерного осаждения для получения ВТСП-2 // Ноу-хау № 158/2013 от 03.12.2013, приказ № 1779 от 24.12.2013.

A30. Морозов О.В., Крылов В.Е., Дегтяренко П.Н., Стоякин В.В., Шавкин С.В., Свистунова О.И., Ревазов В.В. / Получение сверхпроводящего слоя ВТСП-2 в камере с контролируемой газовой атмосферой в установке импульсного лазерного осаждения // Ноу-хау № 159/2013 от 03.12.2013, приказ № 1779 от 24.12.2013.

А31. И.М. Абдюханов, П.Н. Дегтяренко, В.В. Гурьев, П.А. Лукьянов, М.В. Поликарпова, С.В. Шавкин / Способ исследования характеристик ВТСП-проводников // Ноу-хау КТ № 428/35К от 28.01.2014.

А32. В.С. Калитка, С.В. Самойленков, П.Н. Дегтяренко, Ю.В. Тысячных, Чалых Б.Б. «Система криогенного обеспечения двигателя с обмотками на основе ВТСП» // 28.12.2017.

А33. В.С. Калитка, С.В. Самойленков, П.Н. Дегтяренко, Ю.В. Тысячных, Чалых Б.Б. «Способ изготовления обмоток ВТСП-электродвигателя» // 28.12.2017.