

На правах рукописи

Сотникова (Комарова) Алла Павловна

**МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ В
СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Специальность 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Автор



006661765

28 ДЕК 2016

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Руднев Игорь Анатольевич, НИЯУ МИФИ

Научный консультант: доктор технических наук
Высоцкий Виталий Сергеевич, ОАО «ВНИИКП»

Официальные
оппоненты: Доктор физико-математических наук
Ельцев Юрий Федорович
ведущий научный сотрудник, Физический институт
им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва

Доктор технических наук
Круглов Сергей Леонидович
ведущий научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский
институт», г. Москва

Ведущая организация: Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)

Защита состоится " 15 " февраля 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.212.130.04 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409 Москва, Каширское ш., 31

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Автореферат разослан

" ____ " ____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Чернов И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сверхпроводимость – свойство определенных материалов проводить электрический ток без резистивных энергетических потерь при понижении температуры ниже критической. Помимо критической температуры T_c сверхпроводники характеризуются рядом других, важных для практического применения, параметров, из которых основными являются критическая плотность тока J_c и величина критического магнитного поля H_c .

Широкому использованию этого физического явления многие годы препятствовали недостаточно высокие критические характеристики сверхпроводников. С появлением в 1960-х годах технических сверхпроводников 2-го рода ($NbTi$, Nb_3Sn) с достаточно высоким значением критического поля начинается производство устройств, позволяющих создавать сильные и стабильные магнитные поля для использования в ускорителях, токамаках, оборудовании для магнитной сепарации, томографии и т.д. Открытие в 1986 г. материалов, имеющих значительно более высокие температуры перехода в сверхпроводящее состояние (например, $T_c = 92$ К для $YBa_2Cu_3O_{7-x}$), привело к существенному расширению потенциальных областей их промышленного использования, так как охлаждение этих материалов требует значительно меньших затрат.

Первые промышленные успехи в создании длинномерных проводов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) связаны с разработкой лент в серебряной оболочке на основе керамического сверхпроводника $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ (BSCCO), получивших название лент 1-го поколения (1G). Несколько позднее появилась технология производства композитных лент 2-го поколения (2G) на основе тонких ВТСП пленок систем $RE-Ba-Cu-O$ (REBCO, RE – редкоземельный химический элемент). ВТСП композиты 2-го поколения обладают свойством проводить высокие значения тока в магнитных полях при охлаждении жидким азотом, улучшенными механическими свойствами и перспективой снижения стоимости в будущем, по сравнению с первым поколением.

Важность применения ВТСП лент определяется их преимуществами по сравнению с традиционными проводниками: сокращение потерь электроэнергии; снижение линейных размеров оборудования; повышение

надежности и продление срока эксплуатации электрооборудования за счет снижения старения изоляции; повышение надежности и устойчивости работы энергосистем; снижение стоимости электроэнергии, поставляемой потребителям; повышение уровня пожарной и экологической безопасности электроэнергетики. Таким образом, использование ВТСП материалов для разработки различных электроэнергетических устройств, является актуальной задачей для повышения производительности и эффективности данных устройств.

Ведущими поставщиками композитных ВТСП проводов сегодня являются: *American Superconductor (AMSC)*, *SuperPower Inc (SP)*, *SuNAM Superconductor Technologies Inc.*, *Sumitomo Electric Industries*. Различные технологии производства обуславливают различные качества образцов со своими сильными и слабыми сторонами. В связи с актуальностью использования ВТСП материалов для изготовления различных типов устройств, в данной работе предметом исследований являлись ВТСП композиты перечисленных выше производителей: 2G лента с магнитной подложкой компании *AMSC*, 2G лента с немагнитной подложкой компании *SP*, 2G лента компании *SuNam* без искусственных центров пиннинга, 1G лента компании *Sumitomo*. Образцы отличались своим составом, свойствами. ВТСП лента компании *AMSC* имеет магнитную подложку, остальные образцы с немагнитными подложками из Хастеллоя (сплав никеля, молибдена и хрома). Образец компании *SuNam* в отличие от других на основе гадолиния и без искусственных центров пиннинга. Компании *AMSC* и *SP* внедряют разные искусственные центры пиннинга. Все 3 компании используют различные технологии производства ВТСП лент.

Анализ литературы, проведенный в работе, показал практическое отсутствие данных по критическим токам ВТСП лент в магнитных полях, больших 10 Тл, и широком диапазоне температур от 4,2 до 77 К. Исследования проводятся, как правило, при одной выбранной температуре, чаще всего при температурах 77 К и 4,2 К и в магнитных полях до 1 Тл.

Целью работы явилось получение новых экспериментальных данных, характеризующих магнитные и транспортные параметры ВТСП композитов, для оценки возможности их применения в различных электротехнических

устройствах в широком диапазоне магнитных полей от нуля до 14 Тл и диапазоне температур от 4,2 К до 77 К.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнены транспортные измерения критического тока и проведен анализ полученных данных для ВТСП лент второго поколения в магнитном поле от 0 до 14 Тл при температуре жидкого азота.
2. Проведены измерения и анализ кривых намагниченности ВТСП лент первого и второго поколений в магнитных полях до 14 Тл при температурах 4,2–77 К.
3. Проведен сравнительный анализ характеристик ВТСП композитов с различной архитектурой при температурах жидкого гелия, неона и водорода.
4. Предложены рекомендации по применению ВТСП композитов с различной архитектурой, транспортными и магнитными свойствами для различных типов устройств, определены оптимальные магнитопольевые и температурные диапазоны использования современных ВТСП лент.

Для решения поставленных задач были проведены измерения магнитопольевых и температурных зависимостей критического тока ВТСП композитов 1-го и 2-го поколений. Измерения проводились с помощью двух различных методов: бесконтактного (магнитные измерения) и прямого контактного (транспортные измерения). В случае малых токов, например, при температуре кипения жидкого азота, использовался прямой контактный метод. При понижении температуры токи растут и применения контактного метода затруднено, поэтому при температурах ниже температуры кипения жидкого азота применялся бесконтактный метод измерения. Транспортные измерения вольтамперных характеристик проводились в магнитном поле от 0 до 14 Тл при $T=77$ К. Магнитное поле создавалось с помощью магнита Биттера. Магнитные измерения образцов проводились с помощью вибрационного магнитометра в магнитных полях от 0 до 14 Тл и при температурах от 4,2 до 77 К. Магнитное поле создавалось сверхпроводящим магнитом. Транспортные и магнитные измерения неоднократно проводились на разных партиях лент данных производителей, при этом один и тот же образец партии использовался как при транспортных, так и магнитных измерениях. Полученные результаты оказались

воспроизводимыми. Поэтому в этой работе приводятся результаты измерений на примере трех ВТСП лент второго поколения и ленты первого поколения.

Научная новизна

1. Впервые проведены комплексные измерения и сравнительный анализ намагниченности и критического тока ВТСП композитов с различной архитектурой в сильных магнитных полях и широком диапазоне температур.
2. Впервые выполнен сравнительный анализ характеристик ВТСП лент второго поколения с различной архитектурой при температурах сжиженных газов: гелия ($T_{He}^{кип} = 4,2 \text{ К}$), водорода ($T_H^{кип} = 20,3 \text{ К}$) и неона ($T_{Ne}^{кип} = 27,1 \text{ К}$). Установлено, что в магнитных полях более 5 Тл плотность критического тока при повышении температуры от гелиевой до 20–30 К снижается всего на 30–50 %, что указывает на реальную возможность использования жидкого водорода или неона, а также криокуллеров вместо дорогого жидкого гелия.
3. Впервые на основе модели Крамера проведен анализ магнитопольевых зависимостей силы пиннинга в широком диапазоне температур для ВТСП лент различных производителей. Установлено влияние температуры на эффективность центров пиннинга и показано, что механизм пиннинга зависит от ориентации приложенного магнитного поля.
4. Впервые получены экспериментальные данные, характеризующие величину гистерезисных потерь в сверхпроводящих композитах в широком диапазоне температур и магнитных полей.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследований важны для обеспечения эффективной работы электроэнергетических устройств на основе ВТСП лент, а также для конструирования и расчета электроэнергетических и магнитных систем на основе сверхпроводящих материалов, и могут быть в таких организациях, как НИЦ КИ, ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, МГУ им. М.В. Ломоносова, МАИ (НИУ), ОАО «Русский сверхпроводник», ВНИИКП, ОАО «ФСК ЕЭС», ЗАО СуперОкс и др.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальные результаты исследования намагниченности и критического тока ВТСП композитов в магнитных полях от 0 до 14 Тл и при температурах от 4,2 до 77 К:

- экспериментальные результаты, устанавливающие влияние магнетизма металлической подложки на характер поведения намагниченности ВТСП композита;
 - установленные зависимости энергии пиннинга образцов от температуры;
 - установленные зависимости силы пиннинга от магнитного поля;
 - установленные зависимости полных потерь от магнитного поля.
2. Экспериментальные результаты, характеризующие величину гистерезисных потерь в ВТСП композитах в диапазоне температур 4,2–77 К.
 3. Разработанные рекомендации по применению ВТСП лент второго поколения с различной архитектурой, транспортными и магнитными свойствами в различных областях на основании проведенного анализа характеристик ВТСП лент второго поколения различных фирм – производителей.
 4. Выработанные рекомендации по оптимизации параметров криокулера для наиболее эффективного охлаждения систем на основе ВТСП.

Достоверность результатов проведенных исследований определяется физической обоснованностью изучаемых задач, использованием современных методик сбора и обработки исходной информации на основе признанных физических моделей. Результаты получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования в различных условиях.

Личный вклад соискателя

Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии. А именно, автором проведены измерения магнитопольевых зависимостей критического тока на магните Биттера, измерения намагниченности ВТСП лент в сильных магнитных полях на сверхпроводящем соленоиде *Oxford Instruments*, обработка и анализ полученных экспериментальных данных, анализ использования ВТСП лент в магнитных и электротехнических устройствах, анализ использования криокулеров для охлаждения сверхпроводящих магнитов с использованием ВТСП лент.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Научная сессия НИЯУ МИФИ (Москва, 2010 г.); «Прикладная сверхпроводимость» (Москва, 2010 г.); Всероссийская научная школа для молодежи «Образование в

сфере нанотехнологий: современные подходы и перспективы» (Москва, 2010 г.); IV Международная конференция «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости ФПС'11» (Звенигород, 2011 г.); Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Инновации в материаловедении» (Москва, 2013 г.); XI Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (*EUCAS 2013*, Италия); II Международная конференция «Плазменные, лазерные исследования и технологии» (Москва, 2016 г.).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Работа изложена на 145 страницах, содержит 101 рисунок, 13 таблиц и список цитируемой литературы из 109 наименований.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, включая 6 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 1 патент РФ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, указана научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы литературные данные по характеристикам высокотемпературных сверхпроводящих композитов - лент первого и второго поколений, областям их применения и преимуществам, современным технологиям производств. Описана архитектура современных сверхпроводящих композитов, приведены в качестве примера результаты магнитных и транспортных измерений ВТСП лент, проведенных различными лабораториями. На основе обзора и анализа литературных данных поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена методическим вопросам. Описана методика транспортных измерений высокотемпературных сверхпроводящих композитов. Приведено описание использованной магнитной системы при проведении транспортных измерений. Описаны магнит Биттера, методика измерений намагниченности высокотемпературных сверхпроводящих композитов при использовании сверхпроводящего соленоида на 15 Тл.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты транспортных измерений ВТСП композитов. Приведены результаты

измерений вольтамперных характеристик высокотемпературных сверхпроводящих композитов при температуре 77 К в диапазоне магнитных полей от 0 до 14 Тл и двух направлениях: перпендикулярно ($H \parallel c$) и параллельно ($H \parallel ab$) плоскости ленты.

В силу физических и технологических причин, вольтамперные характеристики (ВАХ) ВТСП размыты. Поэтому для определения критического тока сверхпроводников из ВАХ устанавливается критерий перехода в резистивное состояние, например, наличие электрического поля определенной напряженности. Стандартный критерий определения критического тока 0,1 мВ/м. ВАХ описывается степенным законом:

$$V_s = V_c \left(\frac{I_s}{I_c} \right)^n, \quad (1)$$

где I_s – ток, текущий в сверхпроводнике. Степень n – величина, зависящая от различных внутренних и внешних факторов. $V_c = 0,1$ мВ/м. I_c и n зависят от геометрии, магнитного поля и температуры. Параметр n характеризует крутизну ВАХ – скорость нарастания напряжения. Скорость нарастания напряжения должна изменяться плавно, так как эта величина характеризует переход в нормальное состояние, что важно для многих устройств. Поэтому для каждого магнитного поля был вычислен показатель n , и полученные зависимости этого показателя от магнитного поля представлены на рисунке 1.

Полученные зависимости указывают на то, что с ростом магнитного поля показатель n уменьшается вместе со сверхпроводящими свойствами. Причем для образца *SP* в магнитном поле выше 3 Тл ($H \parallel ab$) показатель n резко снижается. Это указывает на увеличение анизотропии сверхпроводящих свойств образца. Критический ток для образцов был определен по критерию изменения напряжения на 0,1 мВ/м из ВАХ (рисунок 2).

Сравнительный анализ критических токов двух образцов показал, что:

- в магнитных полях в диапазоне от 1,5 Тл до 12 Тл и приложенных перпендикулярно плоскости образца образец фирмы *SP* демонстрирует значения критического тока на 20–40% выше. При этом в полях 12 и 13 Тл образец *SP* все еще является сверхпроводником и значение критического тока равно 2 А;
- в магнитном поле выше 7 Тл, приложенном параллельно плоскости ленты, образец фирмы *AMSC* демонстрирует нулевые значения критического тока, в

то время как критический ток образца фирмы *SP* равен 0,91 А в магнитном поле 7 Тл и 0,34 А в магнитном поле 8 Тл.

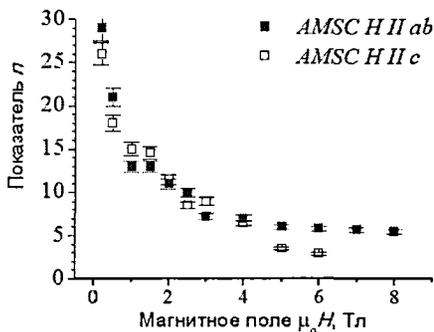


Рисунок 1 – Зависимость показателя n от магнитного поля для образца *AMSC*

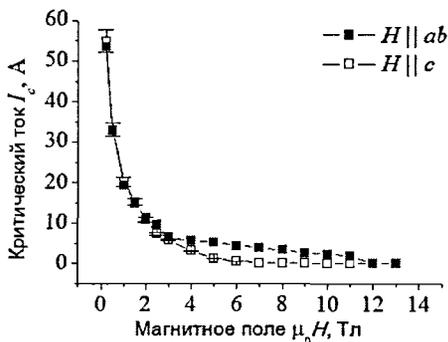


Рисунок 2 – Зависимость $J_c(H)$ в образце *AMSC*

ВТСП являются сверхпроводниками второго рода, то есть во внешнем магнитном поле они могут находиться в смешанном состоянии, когда магнитный поток частично проникает в сверхпроводник в виде так называемых абрикосовских вихрей. Повышение устойчивости этой вихревой решетки, как правило, достигается путем создания дополнительных центров пиннинга - микрообластей, характеризующихся различной величиной энергии захвата и фиксации абрикосовских вихрей. Поскольку практическое использование ВТСП в сильноточевой технике требует не только больших значений плотности критического тока, но и их высокой устойчивости во внешних магнитных полях, то реализация этих параметров оказывается принципиально невозможной без создания эффективных центров пиннинга. Поэтому в работе был проведен анализ механизма пиннинга в образце. Для этого были построены зависимости силы пиннинга от магнитного поля, используя модель Дью-Хьюза и метод Крамера. Согласно модели Дью—Хьюза сила пиннинга равна:

$$F_p = F_{po} \cdot b^n \cdot (1 - b)^m, \quad (2)$$

Где $b = H/H^*$, F_{po} – соответствует максимальной силе пиннинга, H^* – магнитное поле необратимости, при котором критическая плотность тока равна нулю. Коэффициенты n и m зависят от соответствующего механизма пиннинга. При $n = 0,5$ и $m = 2$ – механизм пиннинга относится к поверхностному пиннингу,

при $n = 1$ и $m = 2$ – механизм пиннинга относится к точечному пиннингу, при $n = 0$ и $m = 2$ – механизм пиннинга относится к объемному пиннингу. Сила пиннинга рассчитывалась путём умножения критической плотности тока на величину магнитного поля.

При пониженных температурах поле необратимости экспериментально сложно измерить из-за его высокого значения. Поэтому для его определения были построены так называемые функции Крамера. Функции Крамера – графики функции $f = j_c^{0,5} \cdot H^{0,25}$, обычно линейно зависят от магнитного поля. Поэтому для нахождения поля необратимости полученные зависимости были аппроксимированы линейными функциями. Сила пиннинга была нормирована на максимальную полученную силу пиннинга для каждого образца, а магнитное поле нормировалось на величину магнитного поля, полученную с помощью метода Крамера.

Полученные зависимости, представленные на рисунке 3, демонстрирует влияние ориентации магнитного поля на механизм пиннинга. В магнитном поле, перпендикулярном плоскости ленты, механизм пиннинга соответствует поверхностному пиннингу, а в магнитном поле параллельном плоскости ленты точечному.

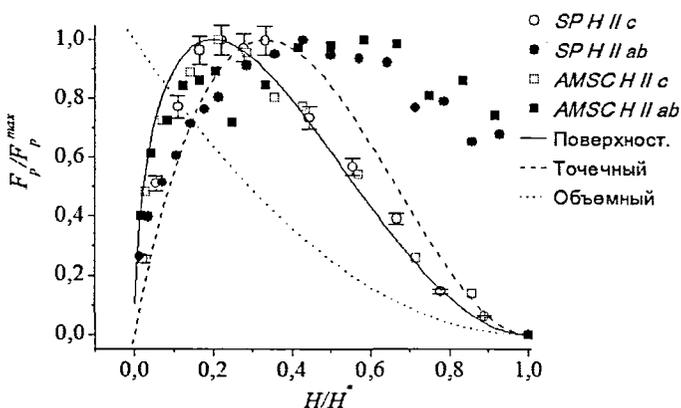


Рисунок 3 – Зависимость силы пиннинга от величины магнитного поля и его направления в различных образцах SP и AMSC

Обобщая экспериментальные результаты транспортных измерений следует отметить следующее.

- Образец 2G ВТСП ленты с магнитной подложкой (*AMSC*) в среднем обладает меньшей анизотропией критического тока по отношению к направлению приложенного магнитного поля, чем образец 2G ВТСП ленты с немагнитной подложкой (*SP*).
- Значения критического тока образца с немагнитной подложкой (*SP*) в магнитном поле, приложенном перпендикулярно плоскости ленты, в среднем выше на 20–40 %, чем значения критического тока этого образца в магнитном поле, приложенном параллельно плоскости ленты.
- Анализ теоретических и экспериментальных зависимостей сил пиннинга от магнитного поля показывает, что ориентация магнитного поля влияет на механизм пиннинга в образце.

Четвертая глава посвящена экспериментальным результатам магнитных измерений высокотемпературных сверхпроводящих композитов. Приведены данные по измерениям намагниченности высокотемпературных сверхпроводящих композитов 1-го (*Sumitomo*) и 2-го (*SP, Sunam, AMSC*) поколений в диапазонах температур от 4,2 К до 77 К и магнитных полях от 0 до 14 Тл. Проведено сравнение намагниченности образцов с подложками, обладающими различными магнитными свойствами (*AMSC, SP*), приводятся зависимости критического тока от магнитного поля, полученных с помощью модели Бина (*AMSC, SP, Sunam, Sumitomo*), зависимости силы пиннинга высокотемпературных сверхпроводящих композитов от магнитного поля (*AMSC, SP, Sunam*). Также описаны результаты измерений магнитной релаксации высокотемпературных сверхпроводящих композитов (*AMSC, SP*), скорости релаксации и энергии пиннинга (*AMSC, SP*), представлено сравнение данных по транспортным и магнитным измерениям (*AMSC, SP*). Проведен анализ механизма пиннинга, а также построены зависимости полных потерь за цикл от магнитного поля (*AMSC, SP, Sunam*).

Зависимости критической плотности тока от магнитного поля рассчитывались из кривых намагниченности с помощью модели Бина, согласно которой критическая плотность тока пропорциональна ширине петли намагниченности. В зависимости от формы образца коэффициенты

пропорциональности различны. Плотность критического тока для образцов прямоугольной формы, согласно модели Бина была найдена из выражения:

$$J_c = 4,7 \cdot 10^5 \cdot \Delta M, \quad (3)$$

где J_c – плотность критического тока, ΔM – ширина петли намагниченности.

Зависимости критической плотности тока от магнитного поля были построены для каждого образца для всего диапазона температур (рисунок 4). Для сравнения характеристик двух образцов при различных температурах были построены графики зависимости плотностей критического тока от магнитного поля (рисунок 5).

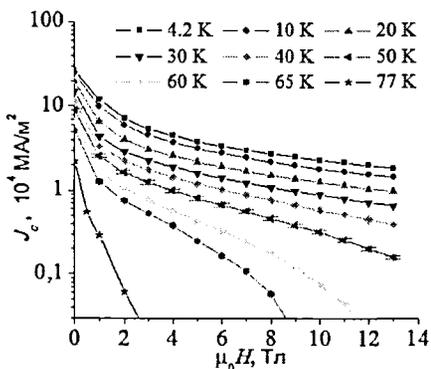


Рисунок 4 – Зависимости $J_c(H)$ для образца компании AMSC

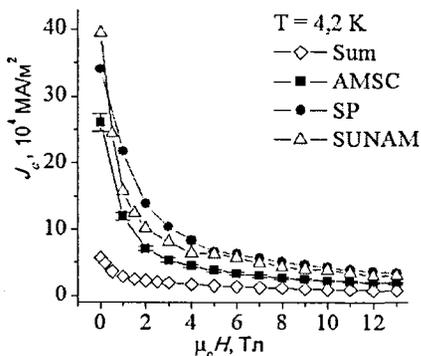


Рисунок 5 – Зависимости $J_c(H)$ для ВТСП лент при температуре 4,2 К

Различные центры пиннинга, состав, технологии производства образцов оказывает влияние на характеристики образца (см. рис. 5). Так, лента с немагнитной подложкой фирмы SP показывает в основном лучшие значения плотности критического тока, чем лента с магнитной подложкой фирмы AMSC (центры пиннинга более эффективные). Образец без искусственных центров пиннинга компании Sunam в нулевом магнитном поле имеет самую высокую критическую плотность тока из всех образцов. Но с увеличением магнитного поля критическая плотность данного образца резко падает. Для сравнения на графике также приведены результаты для ВТСП ленты 1-го поколения компании Sumitomo, которая демонстрирует значения критической плотности тока в несколько раз ниже, чем остальные образцы. Обобщая экспериментальные данные магнитных измерений можно отметить:

- в нулевом магнитном поле разница плотностей критических токов ВТСП образцов фирм *AMSC* и *SP* минимальна по отношению к разнице плотностей критических токов в более высоких магнитных полях. При температуре выше 40 К лента фирмы *AMSC* демонстрирует значения плотности критического тока выше на 10%, чем лента фирмы *SP*;
- в диапазоне магнитных полей от 1 до 14 Тл и при температурах от 4,2 К до 50 К ВТСП лента с немагнитной подложкой фирмы *SP* демонстрирует плотность критического тока выше в среднем на 50%, чем образец с магнитной подложкой *AMSC*, и эта величина незначительно меняется с ростом магнитного поля и температуры ($\pm 10\%$).

Так как образцы *AMSC* и *SP* имеют разные по магнитным свойствам подложки, было проведено сравнение намагниченностей данных образцов. Формы кривых намагниченностей образцов существенно различаются (рисунок 6).

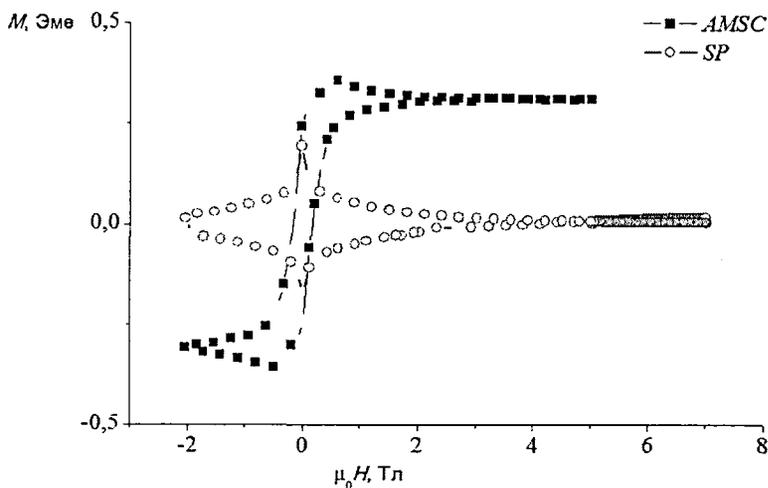


Рисунок 6 – Кривые $M(H)$ при 77 К для образцов с различной архитектурой

Для исключения влияния магнетизма подложки, ее намагниченность измерялась в диапазоне температур от 4,2 до 95 К. Если из суммарной

намагниченности ленты с магнитной подложкой вычесть намагниченность подложки, измеренной при той же температуре, получается намагниченность ВТСП слоя, аналогичная намагниченности образца с немагнитной подложкой по своей форме. Небольшие отличия в кривых остаются, но они обусловлены различием свойств ВТСП материалов (рисунок 7).

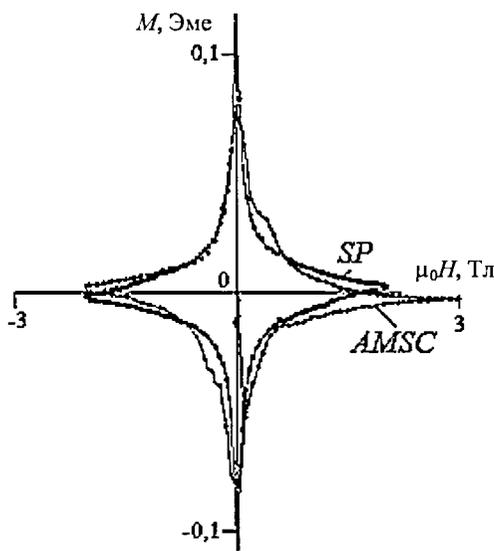


Рисунок 7 – Кривые $M(H)$ ВТСП слоя $AMSC$ и ленты SP при $T=77$ К (без влияния подложки)

Также как и для транспортных измерений, с помощью модели Дью - Хьюза и метода Крамера были получены зависимости силы пиннинга от магнитного поля. Полученные зависимости указывают на то, что при низких температурах $4,2-20$ К механизм пиннинга у всех трех образцов одинаковый и соответствует поверхностному пиннингу (рисунок 8).

При увеличении температуры наблюдаются различия в зависимостях силы пиннинга от магнитного поля, и при температуре 77 К у всех трех образцов четко прослеживаются различия в этих зависимостях (рисунок 9). Это свидетельствует о влиянии температуры на эффективность центров пиннинга. При повышении температуры эффективность центров пиннинга снижается, и наблюдаются различия в механизмах пиннинга. При этом обнаружено, что у

образца с немагнитной подложкой тип пиннинга с изменением температуры не меняется. Это еще раз указывает на различные свойства центров пиннинга.

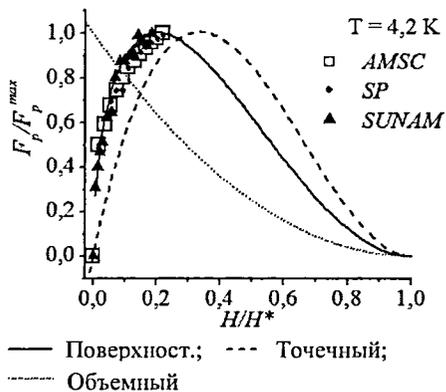


Рисунок 8 – Зависимость силы пиннинга от магнитного поля при температуре 4,2 К

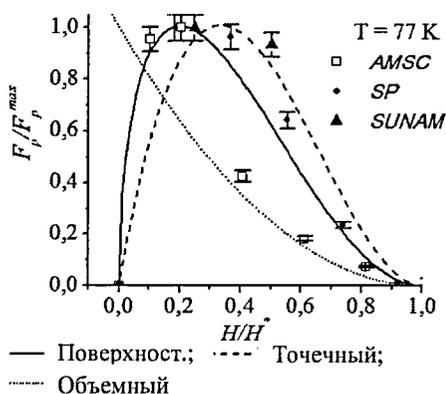


Рисунок 9 – Зависимость силы пиннинга от магнитного поля при температуре 77 К

Следующая часть главы была посвящена релаксации намагниченности и энергии пиннинга. Процесс релаксации намагниченности в высокотемпературных сверхпроводниках является важным явлением с точки зрения практического использования. Релаксация определяет кинетику переходных процессов устройств различного назначения, которые подвергаются воздействию быстро изменяющихся магнитных полей.

Для оценки энергии пиннинга в образце была измерена релаксация остаточного магнитного момента в нулевом магнитном поле, которая определяется соотношением:

$$S = \frac{\partial \ln M}{\partial \ln t}, \quad (4)$$

где S – скорость релаксации; M – намагниченность; t – время.

На полученных зависимостях релаксации магнитного момента можно выделить две области с различными законами изменения магнитного момента во времени. Первая область соответствует изменению намагниченности со временем по экспоненциальному закону, так называемая быстрая магнитная релаксация. Вторая область определяется логарифмическим законом изменения

намагниченности в зависимости от времени, медленная магнитная релаксация. Быстрая релаксация намагниченности определяется наличием слабого пиннинга. Медленная магнитная релаксация определяется сильным пиннингом.

Область быстрой релаксации, относится к интервалу времени примерно 0–30 с для образца *SP* и 0–50 с для образца *AMSC*. Быстрая релаксация связана с выходом магнитного потока из образца. Через примерно 20 секунд скорость релаксации замедляется, что свидетельствует об изменении механизма выхода магнитного потока из образца в соответствии с физическим механизмом термоактивированного крипа магнитного потока.

Согласно модели термически активированного крипа потока, скорость логарифмической релаксации S связана с энергией активации U вихревой системы (энергией пиннинга) соотношением:

$$S = \frac{kT}{U}, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – температура, U – энергия пиннинга. Энергия пиннинга, определенная в соответствии с соотношением (5), в зависимости от температуры образца представлена на рисунке 10.

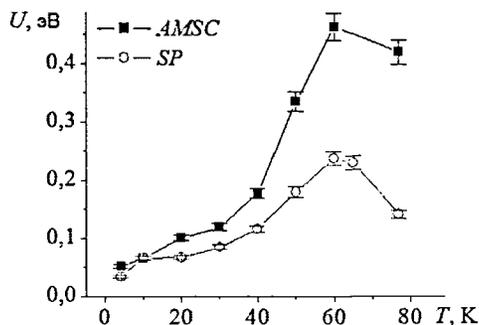


Рисунок 10 – Зависимость энергии пиннинга от температуры ВТСП образцов компаний *AMSC* и *SP*

Анализ релаксации магнитного момента ВТСП лент второго поколения показал, что скорость релаксации с ростом температуры увеличивается, причем при температуре 77 К значение скорости релаксации превышает значения при температурах ниже 77 К в несколько раз. Отсюда можно заключить, что

релаксация магнитного момента при температуре 77 К может влиять на характеристики, получаемые из намагниченности, в частности критический ток.

Сравнительный анализ данных, полученных при магнитных и транспортных измерениях показал, что только в нулевом поле отличия плотностей критических токов образцов менее 10 %, а в более высоких полях это отношение составляет более 50 %. Метод магнитных измерений обладает большей чувствительностью, в связи с этим значения плотностей критических токов, получаемые из магнитных измерений обычно ниже, чем данные транспортных измерений (рисунки 11 и 12). Такое отличие может быть вызвано тем, что скорость релаксации магнитного момента, как было описано выше, существенна при температуре 77 К, поэтому при этой температуре возникает различие плотностей критического тока. Но так как при более низких температурах скорость релаксации магнитного момента в несколько раз меньше скорости магнитной релаксации при температуре 77 К, можно сделать предположение, что при более низких температурах отличия в величинах плотностей критического тока, полученных двумя разными методами, не возникнет.

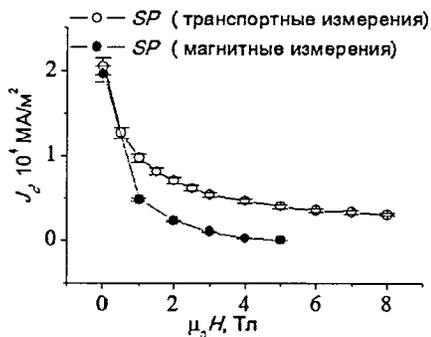


Рисунок 11 – Зависимости $J_c(H)$ для образца компании SP

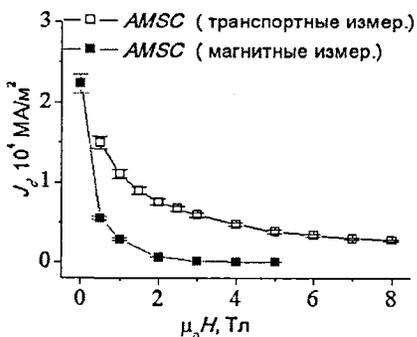


Рисунок 12 – Зависимости $J_c(H)$ для образца компании AMSC

Проведен анализ полных потерь за цикл в образце, которые были вычислены из измерений намагниченности. Гистерезисные потери равны площади петли намагниченности в диапазоне от минимального до максимального значения магнитного поля. Гистерезисные потери за цикл в

единице объема были рассчитаны для диапазона магнитных полей от 0 до 14 Тл и диапазоне температур 4–77 К. Полученные зависимости приведены на рисунках 13 и 14.

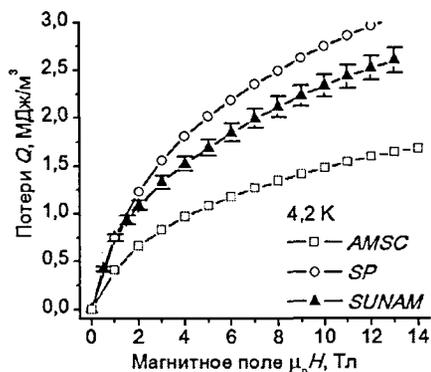


Рисунок 13 – Полные потери за цикл в ВТСП лентах при температуре 4,2 К

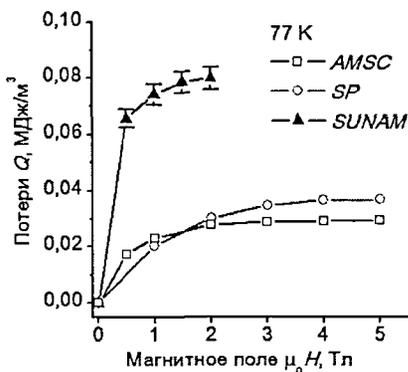


Рисунок 14 – Полные потери за цикл в ВТСП лентах при температуре 77 К

Сравнительный анализ характера нормированных зависимостей потерь данных образцов показал, что нормированные зависимости потерь от магнитного поля при температуре 4,2 К совпадают, но с ростом температуры эти зависимости для разных образцов начинают расходиться и уже при температуре 77 К различия в зависимостях нормированных потерь от магнитного поля наиболее ярко выражено (рисунки 15 и 16). Это указывает на то, что эффективность центров пиннинга по-разному сказывается на свойствах образца и потерях в образце. И при низких температурах эффективность центров пиннинга у всех образцов примерно одинакова, но с ростом температуры очевидны расхождения в свойствах образцов и эффективности центров пиннинга, а также различия в механизме пиннинга.

Пятая глава посвящена оценке применимости высокотемпературных сверхпроводящих композитов в различных электротехнических устройствах. Проведено сравнение магнитных и транспортных характеристик ВТСП образцов второго поколения при температурах жидкого гелия, водорода и неона. Определены оптимальные магнитополевые и температурные диапазоны использования современных ВТСП. Проведен анализ применимости

современных кулеров для охлаждения систем с использованием ВТСП композитов.

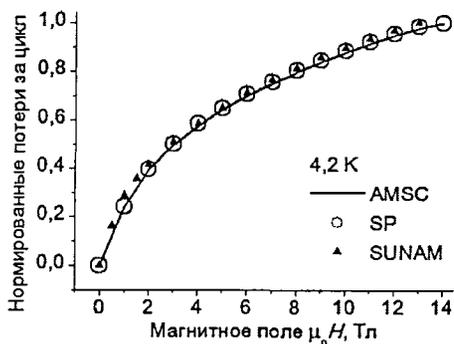


Рисунок 15 – Нормированные потери за цикл в единице объема ВТСП лент при температуре 4,2 К

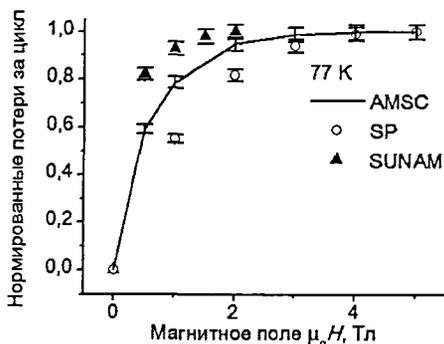


Рисунок 16 – Нормированные потери за цикл в единице объема ВТСП лент при температуре 77 К

Проведен комплексный сравнительный анализ полученных магнитных и транспортных характеристик ВТСП композитов для составления рекомендаций по их применению в различных электротехнических устройствах. Для данного анализа для устройств, работающих при температурах близких к 77 К использовались результаты транспортных измерений; работающих при температурах ниже 77 К использовались результаты магнитных измерений. Для составления рекомендаций по целесообразности применения ВТСП лент в различных областях был проведен комплексный сравнительный анализ полученных магнитных и транспортных характеристик ВТСП композитов с различной архитектурой. В таблице 1 приведены рабочие поля и температуры, необходимые для основных устройств на основе ВТСП композитов, а также даны рекомендации по их применению для каждого устройства.

Проведено сравнение характеристик ВТСП лент второго поколения при температурах жидкого гелия, неона, водорода и оценена возможность использования данных лент в жидких неоне и водороде. Ниже приведены графические зависимости намагниченности от магнитного поля при температурах $T = 4,2$ К, 20 К и 30 К для одного из образцов. Из соотношения (1) оценены плотности критических токов при данных температурах

(рисунки 17 и 18). Полученные результаты указывают на то, что в магнитных полях более 5 Тл плотность критического тока при повышении температуры от гелиевой до 20–30 К снижается всего на 30–50 %. Поэтому в целях экономии хладагента вместо жидкого гелия можно использовать жидкий неон или водород в тех областях применения ВТСП, где не требуются такие высокие значения токов, как при температуре жидкого гелия. Вместо хладагента можно использовать криокулеры, позволяющие получить температуры до 20 К.

Таблица 1 – Применение ВТСП лент: условия работы, необходимые параметры

Применение	Рекомендованный ВТСП
Кабели $B_{\text{раб}}: 0,01-1 \text{ Тл}, T_{\text{раб}}: 70-77 \text{ К}$	Образец на магнитной подложке фирмы <i>AMSC</i>
Моторы и генераторы $B_{\text{раб}}: 1-3 \text{ Тл}, T_{\text{раб}}: 30-65 \text{ К}$	Образец на немагнитной подложке фирмы <i>SP</i>
Трансформаторы $B_{\text{раб}}: 0,1 \text{ Тл}, T_{\text{раб}}: 65-77 \text{ К}$	Образец на магнитной подложке фирмы <i>AMSC</i>
Токоограничители $B_{\text{раб}}: 0,1 \text{ Тл}, T_{\text{раб}}: 65-77 \text{ К}$	Образец на магнитной подложке фирмы <i>AMSC</i>
Индуктивные накопители энергии $B_{\text{раб}}: 1-3 \text{ Тл}, T_{\text{раб}}: 4-50 \text{ К}$	Образец на немагнитной подложке фирмы <i>SP</i>

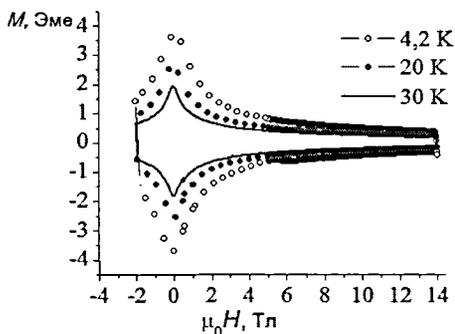


Рисунок 17 – Намагниченность ВТСП ленты *SP* при 4,2 К, 20 К и 30 К

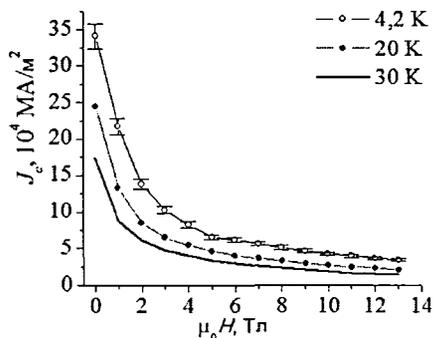


Рисунок 18 – Зависимости $J_c(H)$ для образца фирмы *SP*

Были оценены параметры криокулеров для охлаждения устройств, изготовленных из образцов, приведенных в данной работе, а именно: была получена зависимость мощности кулера $P_{\text{кул}}$ в зависимости от скорости

развертки магнитного поля V и потерь в образце Q . Выведенное соотношение для оценки максимальной скорости развертки поля или необходимой мощности кулера для охлаждения образца имеет вид:

$$P_{\text{кул}} = \frac{Q \times V}{4 \times B} \cdot \frac{L}{b}, \quad (6)$$

где L , b , B – длина необходимого провода, ширина ВТСП образца и магнитное поле, соответственно.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных измерений кривых намагниченности в диапазоне температур от 4,2 до 77 К и диапазоне магнитных полей от 0 до 14 Тл установлены зависимости критического тока, силы пиннинга и энергетических потерь от магнитного поля ВТСП композитов с различной архитектурой, составом и технологией производства.
2. Впервые в результате проведенного сравнительного анализа характеристик ВТСП лент второго поколения с различной архитектурой при температурах сжиженных газов – гелия ($T_{He}^{\text{кип}} = 4,2$ К), водорода ($T_{H_2}^{\text{кип}} = 20,3$ К) и неона ($T_{Ne}^{\text{кип}} = 27,1$ К) – установлено, что в магнитных полях более 5 Тл плотность критического тока при повышении температуры от гелиевой до 20–30 К снижается всего на 30–50 %, что указывает на реальную возможность использования жидкого водорода или неона, а также криокуллера вместо жидкого гелия.
3. Впервые на основе модели Крамера проведен анализ магнитопольевых зависимостей силы пиннинга в широком диапазоне температур для ВТСП лент различных производителей, и установлено влияние температуры на эффективность центров пиннинга, а также показано, что ориентация приложенного магнитного поля влияет на механизм пиннинга в образце.
4. Впервые получены экспериментальные данные, характеризующие величину гистерезисных потерь в сверхпроводящих композитах в широком диапазоне температур и магнитных полей, и показано, что образец фирмы *SP* в диапазонах магнитных полей от 0 до 14 Тл и температур 4–65 К демонстрирует большие потери за цикл, чем другие образцы. При $T = 4,2$ К и магнитном поле 14 Тл потери за цикл в образце фирмы *SP* составляют 3,1 МДж/м³, что почти в два раза превышает потери в образце *AMSC* (1,7 МДж/м³ за цикл).

5. Обнаружено, что при температуре 77 К величина потерь образца фирмы *Sunat* почти в 3 раза превышает потери в двух других образца. Величина потерь для образца фирмы *Sunat* в магнитном поле 5 Тл при этой температуре составляет $0,08 \text{ МДж/м}^3$, при этом величины потерь двух других образцов составляют $0,04 \text{ МДж/м}^3$ для образца *SP* и $0,03 \text{ МДж/м}^3$ для образца *AMSC*.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. И.А. Руднев, А.П. Комарова, П.В. Бобин. Гистерезисные явления в пленочных наноструктурированных высокотемпературных сверхпроводящих композитах на магнитных и немагнитных подложках // Перспективные материалы. – 2011. – Вып. 11. – С. 191–195.
2. I. Rudnev, A. Komarova, P. Bobin. Peculiarities of magnetization of second generation high-temperature superconducting tapes in a wide temperature range // J. of Physics: Conference Series. – 2011 – V. 291. – P. 012048.
3. В.А. Кашурников, А.Н. Максимова, И.А. Руднев, А.П. Сотникова. Нелинейное взаимодействие ферромагнетика и высокотемпературного сверхпроводника // ЖЭТФ. – 2013. – Т. 143(3). – С. 546–556.
4. S. Pokrovskiy, N. Mineev, A. Sotnikova, Y. Ermolaev, I. Rudnev. The study of relaxation characteristics of stack of HTS tapes for use in levitation systems and trapped flux magnets // J. of Physics: Conference Series. – 2014. – V. 507. – P. 022025.
5. I. Rudnev, A. Mareeva, N. Mineev, S. Pokrovskiy, A. Sotnikova. Contactless measurements of local transport characteristics of coated conductors under the bending strain // J. of Physics: Conference Series. – 2014. – V. 507. – P. 022029.
6. A. Sotnikova, I. Rudnev. The effect of temperature on pinning mechanisms in HTS composites // J. of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 747. – P. 012047.
7. И.А. Руднев, А.И. Подливаев, С.В. Покровский, А.П. Сотникова. Линейка датчиков Холла для прецизионной магнитометрии / Патент на полезную модель RUS 121940 17.07.2012.

Подписано в печать 13.12.2016 г.
Формат А5
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Тираж 100 Экз.
Типография ООО “ПринтСайдАп”
115093, г. Москва,
ул. Большая Серпуховская, д.31 к.11
Тел. 8-495-587-71-31
www.printside.ru