

ОТЗЫВ

официального оппонента Руднева Игоря Анатольевича, д-р физ.-мат. наук, на диссертацию Фетисова Сергея Сергеевича по теме: «Исследования и разработка токонесущих элементов коаксиальных кабелей, токовводов и проводников на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 - Электротехнические материалы и изделия

Актуальность темы

В диссертационной работе представлено комплексное исследование проблем, направленных на создание нового класса комбинированных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе второго поколения. Такие сверхпроводники все более востребованы в новых электромагнитных системах устройств управляемого термоядерного синтеза, электроэнергетики (кабели, трансформаторы, токоограничители и т.п.), современных системах электродвижения и других. Все эти применения требуют повышенных рабочих токов устройств, чего можно добиться объединением исходных ВТСП лент в те или иные комбинированные проводники. Это весьма непростая задача, в силу особенностей исходных ВТСП проводников, которые, в силу особенности их технологии, выпускаются в виде несимметричных анизотропных лент с токами сверхпроводимости порядка 100-200 А. В то время как различные применения требуют рабочих токов от тысяч до десятков и сотен тысяч ампер. При этом приходится решать задачи обеспечения полного использования всех сверхпроводящих свойств ВТСП лент (равномерное распределение токов по лентам, составляющих комбинированный проводник), снижение потерь в случае работы на переменном токе, обеспечение механической устойчивости при работе в сильных магнитных полях и другие проблемы. В мире пока не существует консенсуса в плане методов создания сильно-токовых токонесущих элементов, за исключением разве что силовых кабелей для передачи электроэнергии. Но и здесь не были решены задачи снижения массогабаритных параметров кабелей для транспортных систем.

Поэтому исследования, представленные в обсуждаемой диссертации, несомненно, весьма актуальны и востребованы практически. Объекты исследования: комбинированные сверхпроводники, кабели, токовводы,

токонесущие элементы (ТНЭ) на основе ВТСП лент второго поколения выбран адекватно.

Оценка структуры и содержания работы.

Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, заключение и список использованной литературы, и одно приложение. Предложенная структура работы достаточно адекватна и соответствует её содержанию.

Во Введении обоснована актуальность работы; сформулированы ее цели и задачи, которые надо решить для достижения указанных целей; указаны предмет и объект исследований, научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов; сформулированы положения, выносимые на защиту; представлены сведения об апробации результатов и о личном вкладе автора.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертации, достаточно широко представлены виды современных высокотемпературных сверхпроводящих материалов и перспективные направления их применения, в особенности ВТСП материалов второго поколения. Обозначены основные направления применения ВТСП в различных устройствах и особенности создания токонесущих элементов для каждого из них и сформулированы задачи настоящего исследования.

Во второй главе описываются основные подходы и разработанные автором методики экспериментальных исследований исходных ВТСП лент и изделий на их основе. Представленные материалы и результаты свидетельствуют о высокой компетенции автора в технике эксперимента и используемом исследовательском оборудовании. Автором предложены и апробированы различные экспериментальные методики, как для характеристики исходных ВТСП лент второго поколения, так и для испытаний изделий на их основе. Полученные и представленные экспериментальные данные не вызывают сомнений.

В третьей главе описываются исследования, посвященные математическому моделированию различных конструкций многоповивных коаксиальных ВТСП кабелей переменного тока и особенностям их изготовления, как в однофазном, так и в трёхфазном исполнении (триаксиальная конструкция). Основным направлением являлось решение задачи по миниатюризации конструкций кабелей с целью улучшения их массогабаритных характеристик, что является

необходимостью для применения таких кабелей в сверхпроводящих системах электродвижения судов и самолетов. Представлены результаты разработки, изготовления и экспериментальных исследований, созданных компактных конструкций: однофазного кабеля с четырьмя повивами в токопроводящей жиле и двумя повивами в экране, и триаксиального кабеля имеющего по два повива в каждой фазе. Разработанные конструкции на основе ВТСП второго поколения являются наиболее компактными силовыми кабелями в мире, известными из опубликованных работ на сегодняшний день.

Четвертая глава посвящена оптимизации конструкции ВТСП кабелей постоянного тока и повышению их критического тока с использованием эффекта продольного магнитного поля. Для этого автором были подробно исследованы зависимости критического тока исходных ВТСП лент в магнитном поле различной ориентации, на основании которых была приложена оригинальная расчётная модель для оптимизации конструкции кабелей. С использованием предложенного подхода был изготовлен и испытан модельный кабель, в котором был учтён эффект продольного поля. В результате проведенных исследований была подтверждена возможность увеличения критического тока кабеля постоянного тока, а предложенная математическая модель адекватна и совпадает с полученными экспериментальными данными.

Автором предложено и обосновано применение кабелей постоянного тока для стационарных систем размагничивания крупных объектов (кораблей), а применение оптимизированных конструкций кабелей, в которых учтён эффект продольного магнитного поля позволяют значительно улучшить массогабаритные характеристики таких систем и позволят снизить количество дорогостоящего ВТСП материала. Предложенные подходы были апробированы и подтверждены на разработанном действующем макете системы размагничивания малых объектов. Использование разработанных ВТСП кабелей при создании обмоток систем размагничивания позволяет в десятки раз снизить массу по сравнению с системами из обычных медных обмоток.

Пятая глава посвящена разработке, созданию и внедрению различных токонесущих элементов на основе ВТСП. В первой части главы автором представлены результаты исследований по оптимизации конструкции ВТСП

токовводов, которые работают во внешнем магнитном поле. Предложенные подходы были успешно применены при создании токовводов для стенда тепловых испытаний макетов жидкометаллического тритий-воспроизводящего blankets в сильном магнитном поле. Для этой установки были изготовлены две пары токовводов, способных работать во внешнем магнитном поле до 2 Тл, с током до 2 кА и обеспечивающих минимальные теплопритоки.

Во второй части главы представлены результаты исследований и разработки обмоточных проводов различного назначения на основе ВТСП лент второго поколения. Одним из основных направлений исследований являлся правильный выбор конструкции и изоляции обмоточных проводов. На основании проведенных исследований была разработана технология изготовления и налажено серийное производство ВТСП проводов на основе волокнистой и пленочной изоляции.

В третьей части главы предложен и обоснован способ формирования обмоток с высокими значениями рабочего тока и обеспечивающий равномерное распределение токов по лентам в составе обмотки. Данное решение было подтверждено и успешно применено при создании обмоток низкого напряжения ВТСП трансформатора мощностью 1 МВА.

В заключении приведены основные выводы по работе. В результате разработаны, изготовлены различные компактные силовые кабели, токонесущие элементы, проводники и токовводы для сверхпроводящих устройств и магнитных систем с использованием ВТСП материалов второго поколения, а предложенные подходы подтверждены экспериментально.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Положения диссертации и сделанные по работе выводы опираются на результаты расчётных и оптимизационных исследований и подтверждены экспериментальными исследованиями, в том числе результатами практического использования уже внедренных решений.

Результаты диссертации достаточно широко опубликованы и докладывались на многих международных и российских конференциях и семинарах. Ряд работ, вошедших в диссертацию, отмечен Премией Губернатора Московской области для молодых учёных и престижной премией имени П.Н. Яблочкова Российской

Академии Наук, что подтверждает качество выполненных исследований.

Научная новизна и практическая значимость результатов исследований

1. В результате проделанной работы созданы методики измерений с применением уникального оборудования и методов обработки результатов, позволяющие с более высокой точностью проводить исследования и испытания исходных ВТСП лент, а также ТНЭ кабелей, проводников и различных устройств на их основе.

2. Предложены новые и усовершенствованы существующие математические модели для оптимизации конструкции компактных коаксиальных и триаксиальных силовых ВТСП кабелей. Показано, что использование разработанных расчётных моделей для конструирования и проведение корректирующей оптимизации в процессе производства позволяют создавать компактные многоповивные коаксиальные ВТСП кабели с равномерным распределением токов по повивам.

3. Разработана математическая модель для расчета токонесущей способности многоповивного кабеля постоянного тока на основе ВТСП-2 лент, с учетом эффекта продольного магнитного поля. Показано, что при учёте этого эффекта в многоповивном кабеле постоянного тока можно существенно увеличить токонесущую способность и эффективность использования дорогостоящего ВТСП материала.

4. Разработана математическая модель и выполнена оптимизация системы размагничивания с обмотками из ВТСП ТНЭ. Показано, что использование ВТСП ТНЭ в системах размагничивания позволяет в десятки раз снизить массу их обмоток.

5. Впервые разработана численная модель для оптимизации ВТСП тоководов, работающих во внешнем магнитном поле.

6. Все разработанные варианты кабелей и ТНЭ верифицированы, т.е., математические модели подтверждены экспериментально на образцах.

Оформление диссертации

Диссертация соискателя имеет внутреннее единство, объединена общей научной идеей создания нового класса ВТСП кабелей, токонесущих элементов, тоководов и других комбинированных проводников. Работа представлена на 277

страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка цитируемой литературы, включающего 179 наименований.

Содержание диссертации и автореферата соответствуют друг другу, а их оформление соответствует ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Результаты диссертации представлены в 36 печатных работах, в частности в 33 статьях российских и зарубежных изданиях из перечня ВАК, и 4-х патентах. Кроме того результаты работы докладывались на 17 международных и российских конференциях.

Замечания и вопросы

1. Основной темой диссертации является разработка ТНЭ на основе ВТСП-2, однако в литературном обзоре сведения о структурных особенностях и методах получения ВТСП-2 лент изложены крайне скупо, в то время как сверхпроводникам на основе соединения MgB_2 уделено слишком много внимания).

2. Из этого замечания вытекает и другое. Специалистам известно, что автор принимал активное участие в создании и испытании первых в мире макетов гибридных энергетических линий с жидким водородом и сверхпроводящим кабелем на основе соединения MgB_2 . Однако эти работы никак ни в диссертации, ни в автореферате не упомянуты.

3. В главе 2 автор декларирует, что для оценки годности ВТСП лент и выявления дефектов, связанных с отслаиванием медного слоя достаточно провести не более 200 циклов термоциклирования в изогнутом состоянии для случая растяжения сверхпроводящего слоя, однако из приведенного рисунка 2.19 такой вывод сделать нельзя. Возможно, автор располагает дополнительными данными, позволяющими делать такое утверждение.

4. В первой главе описаны исследования механических свойств ВТСП лент, по результатам которых получены зависимости относительных критических токов от деформации. На графике 2.15 представлена зависимость относительного критического тока от относительной деформации для разных лент, стоит отметить, что данная зависимость описывает влияние относительной деформации в сверхпроводящем слое, а не в ленте в целом.

5. Встречаются опечатки, стилистические ошибки.

Замечания носят рабочий дискуссионный характер и не снижают значимость

представленной диссертационной работы

Заключение

Диссертационная работа Фетисова Сергея Сергеевича выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и имеет практическую ценность, является работой, в которой решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение, представлены новые научно обоснованные научно-технические и технологические решения.

Диссертация «Исследования и разработка токонесущих элементов коаксиальных кабелей, токовводов и проводников на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения», удовлетворяет критериям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени доктора технических наук, установленным в п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями и дополнениями от 21.04.2016 (№ 335), от 1.10.2018 г. (№ 1168) и от 20.03.2021 г. (№ 426). Учитывая изложенное, считаю, что автор работы **Фетисов Сергей Сергеевич** заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 - «Электротехнические материалы и изделия».

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, доцент, профессор института лазерных и плазменных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Москва, Каширское шоссе 31.

Тел. +7 (495) 788 56 99, доб. 9965, e-mail: Iarudnev@mephi.ru

/Руднев Игорь Анатольевич/



Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

В. М. Самородова