



АО «НИИЭМ»

Исх. № 21.07.22 от 31/248

Акционерное общество  
«Научно-исследовательский институт электромеханики»

ОГРН 1095017003652 ОКПО 04657145 ИНН/КПП 5017084537/501701001

Панфилова ул., д. 11, г. Истра, Московская область, 143502; тел.: (495) 994 51 10, факс: (499) 254 53 75

Для телеграмм: 143500 Истра ВЕКТОР; E-mail: info@niiem.ru

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Фетисова** Сергея Сергеевича  
«Исследование и разработка токонесущих элементов  
коаксиальных кабелей, токовводов и проводников на основе  
сверхпроводящих материалов второго поколения»,  
представленной на соискание ученой степени  
доктора технических наук по специальности  
05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия»

Интерес к применению, а вместе с тем и к исследованиям материалов на основе явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), всё расширяется, поэтому появляются всё новые работы в этой области, подтверждением чему является диссертация Фетисова С.С. на соискание ученой степени доктора технических наук

Диссертация посвящена вопросам исследования физики процессов, разработки конструкции, технологии изготовления, применения токонесущих элементов (ТНЭ) коаксиальных кабелей, токовводов и проводников на основе материалов второго поколения (ВТСП-2). Достижения в области разработки и производства материалов ВТСП-2 с улучшенными характеристиками позволяют вести новые разработки силовых кабелей и внедрение их в энергосети более эффективных электротехнических устройств, а также получение новых возможностей при создании магнитных силовых систем различного назначения.

Разработка ТНЭ, проводов и кабелей на основе ВТСП-2 материалов представляет собой актуальную и важную задачу, для решения которой необходимо провести комплексные исследования, направленные на разработку методов расчёта, технологий изготовления кабелей и ТНЭ, а также создать стенды для экспериментальных исследований создаваемых моделей, а именно:

- компактных коаксиального и триаксиального силовых ВТСП-2 кабелей переменного тока;
- ВТСП-2 кабеля постоянного тока, использующего эффект продольного магнитного поля;
- системы размагничивания с обмотками из ВТСП-2 ТНЭ;
- ВТСП-2 токовводов, работающих во внешнем магнитном поле;
- ВТСП-2 ТНЭ для обмоток сверхпроводящего трансформатора;
- ВТСП-2 ТНЭ для магнитных систем будущих устройств управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Как показано в диссертации, решение поставленных задач должно осуществляться одновременно в нескольких направлениях, не исключая друг друга:

- создание современной экспериментальной базы с разработкой методов измерений и проведения исследований характеристик доступных ВТСП-2 лент;

- создание стендов и методик испытаний разработанных ТНЭ, кабелей, проводников и различных устройств на основе ВТСП-2 для исследования полученных характеристик и доведения их до нужных требований;
- разработка математических моделей для оптимизации конструкций ТНЭ, кабелей, проводников на основе ВТСП-2;
- разработка технологии изготовления моделей ТНЭ, кабелей, проводников и устройств на основе ВТСП-2 для различных применений и их испытания по разработанным методикам;
- подтверждение экспериментальных результатов по характеристикам испытанных прототипов ТНЭ, кабелей, проводников и устройств на основе ВТСП-2 и сопоставление их с результатами теоретических исследований, полученных с помощью разработанных математических моделей.

Основное содержание диссертации изложено во введении, пяти главах, заключении. Список цитируемой литературы содержит 179 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы; сформулированы ее цели и задачи, требующие решения; указаны предмет исследований, научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов; представлены сведения об апробации результатов и о личном вкладе автора.

В первой главе дан литературный обзор по теме диссертации, приведены виды современных технических ВТСП материалов, рассмотрены перспективные направления применения ВТСП материалов второго поколения и особенности ТНЭ, потребные для каждого применения.

Вторая глава посвящена созданию техники эксперимента и методикам испытаний исходных ВТСП лент, ТНЭ и кабелей, поскольку рабочие характеристики вновь создаваемых изделий определяются свойствами исходных ВТСП лент.

Первая часть второй главы посвящена исследованию механических и тепловых характеристик кабелей и лент, поскольку в процессе изготовления исходный материал подвергается механическим и тепловым воздействиям, и знать их влияние на исходный материал необходимо. Исследованию подвергались как единичная лента, так и кабель с серией лент в целом. В качестве критерия отбора качественного материала являлся значение критического тока, характеризующего потерю материалом сверхпроводящих свойств. Создана уникальная установка для исследования находящегося в криостате в атмосфере жидкого азота образца на основе ВТСП-2; в процессе исследований измеряются механические, электрические, тепловые характеристики; требуемая точность измерений весьма высока, в интервале долей процента, в то время как по проводнику пропускается ток в несколько килоампер. Испытанию подвергается каждая отдельная из составляющих лент кабеля. Такой стенд должен быть снабжен измерительной аппаратурой высокой точности.

Во второй половине главы проведено описание электромагнитных испытаний сверхпроводника при помещении его в условия постоянного или переменного магнитного поля, при пропускании через него постоянного или переменного электрического тока. В этих опытах контролируются также потери в проводниках; потери представляют собой интеграл мгновенной мощности за выбранный период времени.

В третьей главе представлены основные разработки в области моделирования, особенности изготовления и результаты экспериментальных исследований силовых компактных коаксиальных и триаксиальных ВТСП-2 кабелей, коаксиальных ТНЭ, работающих на переменном токе.

Математические модели для оптимизации конструкции и получения равномерного распределения токов в отдельных витках компактных коаксиального и триаксиального ВТСП ка-

белей разработаны на основе эквивалентной электрической схемы замещения кабеля и законов Кирхгофа; для трёхмерных моделей применён метод конечного элемента.

Составленная система уравнений для анализа процессов в компактном коаксиальном кабеле, для фаз триаксиального ВТСП кабеля (А,В,С), содержит параметры собственной и взаимной индуктивности каждого из витков фаз, ток и напряжение в них, емкость между витками и фазами, активное сопротивление элементов, частоту тока. При анализе такой системы уравнений, выполняемом с помощью универсальных программ ANSYS Emag и трехмерного 20-узлового элемента - SOLID236; имеется возможность воздействовать на значения буквально каждого из введенных параметров. При этом величины параметров непосредственно связаны с физическими размерами каждого из витков и кабеля в целом, что позволяет оптимизировать процессы вычислений, а в конечном счете, получить изделие оптимальных размеров и параметров. Что и показано в настоящей работе.

Разработанный метод анализа использован при исследованиях сильноточных ВТСП ТНЭ. В российском проекте Токамака Реакторных Технологий (РТТ) требуется создать проводник с токонесущей способностью 80 кА, который способен работать в полях до 15 Тл при рабочей температуре 4,2 К.

Глава 4 посвящена исследованию и разработке ВТСП кабелей и ТНЭ постоянного тока коаксиальной конструкции, а также изучению возможности повышения их токонесущей способности за счет эффекта продольного магнитного поля; изучению влияния способа наложения витков, с целью получения максимального критического тока. Также представлены результаты оптимизации конструкций ВТСП кабелей, которая выполнена с использованием разработанной математической модели, учитывающей эффект продольного магнитного поля. Оптимизация проведена для токонесущего элемента ВТСП кабеля с разным числом витков и способов их наложения с целью получения оптимального числа витков.

Разработанная численная модель хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и может быть использована для выбора оптимальной конструкции ВТСП кабелей постоянного тока.

В процессе исследований показано, что в отличие от ВТСП кабелей переменного тока, в которых должно быть равномерное распределение тока между витками, в кабеле постоянного тока для увеличения его общей токонесущей способности, в каждом витке жилы нужно иметь ток, близкий к критическому току данного витка.

В этой же главе описаны результаты разработки токонесущих элементов на основе ВТСП для стационарных систем размагничивания, а также экспериментальные результаты испытаний макетной системы размагничивания малых объектов. Одним из основных применений таких систем является размагничивание корпусов кораблей. В настоящее время в системах размагничивания применяются обычные медные кабели, и их общая масса может достигать сотен тонн. Для оценки преимуществ, которые дает использование ВТСП материалов, был проведен расчёт размагничивающей системы с использованием медных кабелей. Было получено, что вес только одной секции из 38 составит 50 т. При использовании ВТСП-кабеля оптимальной конструкции возможно снизить массу секции более чем в 50 раз.

В главе 5 излагаются результаты разработки и изготовления ВТСП тоководов, работающих во внешнем магнитном поле, и токонесущих элементов для различного сверхпроводникового оборудования.

Раздел 5.1 посвящен тоководам на основе ВТСП-2, работающим вблизи магнита, т.е. в его внешнем магнитном поле. При создании стенда для магнитогидродинамического генератора разработан токовод, работающий одним концом при температуре жидкого гелия (-4,5 К), а другим концом при температуре жидкого азота (- 77 К). В конструкции тоководов применены кроме ВТСП-ленты, медь, силовые конструкции из нержавеющей стали.

При разработке математической модели учтены физические свойства всех примененных материалов, тепловыделение в меди и ВТСП- слоях лент, если они переходят в нормальное состояние.

В численной модели для решения уравнений теплообмена применен метод конечных разностей, использующий неявную схему. Поскольку имеет место нелинейное поведение тепловыделения в ВТСП слоях лент и зависящая от температуры теплопроводность элементов токоввода, в модели используется итерационный алгоритм (метод простых итераций).

Разработанный алгоритм позволил рассчитать необходимое количество слоёв самоохлаждаемого токоввода, что позволило получить оптимальную конструкцию токоввода, работающего вблизи сильного магнитного поля, выбрать необходимое количество слоёв ВТСП-лент и их размеры.

В разделе 5.2 представлены результаты исследования и разработки обмоточных ВТСП проводов, соответствующих современным требованиям пожарной безопасности и специальным требованиям. Разработаны и введены в действие Технические Условия с присвоением литеры «А» и каталожные описания на обмоточные ВТСП провода, а сами провода готовы к серийному выпуску.

В разделе 5.3 описаны результаты разработки и исследований ВТСП ТНЭ для обмоток трансформатора. Наиболее оптимальной конструкцией при разработке обмоток трансформатора является изготовление обмотки из нескольких параллельных лент, намотанных на цилиндр. Такая конструкция позволяет помещать отдельные витки в одинаковые электромагнитные и тепловые условия. Результаты испытаний модельных обмоток подтвердили возможность создания ТНЭ из параллельных ВТСП лент для изготовления обмоток сверхпроводящих устройств. Данная технология была успешно применена при изготовлении обмоток низкого напряжения трансформатора мощностью 1МВА. Испытания макетного образца трансформатора с ВТСП обмотками показали снижение потерь в 27 раз по сравнению с потерями в аналогичном трансформаторе с обычными обмотками.

В заключении показано, что в результате экспериментальных и теоретических исследований, направленных на разработку математических моделей, новых технологий изготовления, разработаны, изготовлены и экспериментально проверены компактные силовые кабели на основе ВТСП-2, имеющие важное хозяйственное значение, в том числе для развития специальной техники.

Особенно хотелось бы отметить скрупулёзность автора при накоплении фактического материала и накоплении баз данных при расчетах математических моделей, выборе влияющих параметров. Ведь его подход – получить экспериментальные данные и их обработать буквально от каждой из неисчислимых лент, входящих в ВТСП кабель.

Однако вызывает сомнение применение обозначенных материалов в электротехнических конструкциях, а именно в трансформаторах, электрических машинах. Поскольку применение ВТСП-обмоток требует организации захлаженной зоны как минимум до температур жидкого азота из-за применения повышенной теплоизоляции, в то время как конструкции «горячих» зон, каковыми являются магнитопроводы, должны будут иметь повышенные размеры по сравнению с обычными электротехническими устройствами. А это неизбежно вызовет увеличение массы, потерь в элементах конструкций, а следовательно, необходимость организации путей их отведения. Очевидно, при проектировании электротехнических устройств с применением ВТСП-обмоток следует проводить оптимизационные расчеты с включением в общую массу и элементов системы генерирования захлаживания. Вероятно, оптимизационные расчеты следует проводить и по оптимуму стоимости всей системы, совместно с элементами системы захлаживания.


Основное содержание диссертации опубликовано в виде научных статей в журналах России и зарубежных, доложены на многих конференциях. Автором получены ряд патентов на полезную модель.


Работа актуальна, сделанные замечания не умаляют её достоинства, а недостатки не влияют на общую положительную оценку работы **Фетисова С.С.**

Диссертация отвечает требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук.

Исполняющий обязанности  
ген. директора АО «НИИЭМ»  
Ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук



  
А.В. Бубен

  
М.Л. Круглова