

ОТЗЫВ

На диссертацию Диева Дмитрия Николаевича
«Исследования низкотемпературных физико-механических свойств
элементов конструкции проводов на основе Nb_3Sn и ВТСП-лент второго
поколения»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Современные тенденции в использовании сверхпроводников для создания сильных магнитных полей характеризуются постоянным увеличением величины поля и размеров магнитных систем. В связи с этим растут механические напряжения, возникающие в обмотках магнитных систем. Значительно увеличивается и механическая нагрузка на токонесущие элементы, из которых такие системы изготовлены. Это касается и низкотемпературных сверхпроводников, используемых для создания крупных установок, в том числе магнитной системы международного термоядерного реактора ИТЭР. Это касается и магнитных систем на основе высокотемпературных сверхпроводников, работающих при пониженных температурах, вплоть до температуры жидкого гелия.

Диссертация Диева Д. Н. посвящена разработке и созданию ряда устройств и методик, предназначенных для исследования механических свойств сверхпроводниковых токонесущих элементов, проводов и отдельных элементов конструкции сверхпроводящих устройств.

Часть представленных результатов получена в рамках работ по программе ИТЭР – крупнейшему международному проекту в области термоядерной энергетики, где сверхпроводящие магнитные системы являются центральным элементом устройства.

Исследования физико-механических свойств высокотемпературных сверхпроводников представляют собой исключительную важность в силу растущего их использования для получения магнитных полей, которые уже не могут быть созданы с помощью «обычных» низкотемпературных сверхпроводников.

Таким образом, тема рассматриваемой диссертации является и актуальной и представляющей как научный, так и практический интерес.

Диссертация состоит из введения и четырех глав.

Во введении дается общая характеристика работы, формулируются поставленные цели и положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературы по тематике диссертации. Рассмотрена существующая проблематика использования сверхпроводников для решения практических задач. В частности, обоснована необходимость подробного исследования механических свойств труб-оболочек низкотемпературного сверхпроводникового кабеля. В обзоре приводится описание существующих на данный момент испытательных машин, анализируются их преимущества и недостатки; рассматривается их применимость относительно задачи по исследованию труб-оболочек, предназначенных для ИТЭР.

На основании существующих данных, диссертант делает вывод о том, что перспективные разработки кабелей в оболочке на основе высокотемпературных сверхпроводников требуют иного подхода в исследовании их механических свойств. А именно, требуется исследовать свойства непосредственно высокотемпературных (ВТСП) сверхпроводящих проводов. Далее рассматриваются работы, посвященные данному вопросу. Отдельно рассматривается проблема снижения токонесущей способности ВТСП-обмоток, пропитанных компаундом, при многократном термоциклировании. Делается вывод о влиянии механических напряжений, вызванных температурной деформацией обмотки. Дается краткое описание методов проведения механических испытаний ВТСП-лент, с приложением механической нагрузки в продольном и поперечном направлениях.

Во второй главе приводится подробное описание процесса разработки и создания установки для проведения механических испытаний труб-оболочек в широком диапазоне температур. Описывается общая схема проведения испытаний, а также прочностной расчет крепежных элементов, необходимых для проведения испытаний при комнатной температуре. Делается ряд предварительных расчетов для определения наиболее подходящей конструкции системы криогенного обеспечения. В итоге делается выбор в пользу погружного криостата, передающего усилие на образец через корпус. Далее приводятся детальные расчеты механической прочности элементов конструкции криостата. Дается описание оценочного теплового расчета криостата в целом, делается предположение о затратах жидкого гелия на одно испытание. Далее автором приводится пошаговая методика проведения испытаний при температуре жидкого гелия, а также

описание отладочного эксперимента, в котором в качестве хладагента был использован жидкий азот.

Третья глава посвящена результатам испытаний труб-оболочек. Приводятся общие данные по испытаниям труб при комнатной температуре. Отдельно и более подробно рассматриваются испытания труб-оболочек при температуре жидкого гелия. Делаются выводы о влиянии наличия сварного шва и состояния материала образца на результаты испытаний. Автор высказывает предположения относительно возможности упрочнения образцов путем изменения режима сварки.

В четвертой главе рассматривается разработка устройств для проведения исследований физико-механических свойств ВТСП-лент второго поколения, а также создание соответствующей методической базы. Автор приводит описание конструкции разработанных устройств для проведения испытаний с приложением продольной и поперечной механической нагрузки, а также общих принципов их действия. Далее диссертант подробно описывает процесс пайки образцов, необходимой для закрепления их на испытательных устройствах. Рассматриваются вопросы выбора припоя, флюса и оптимального режима пайки.

Приводятся результаты испытаний ВТСП-лент различных производителей с приложением поперечной механической нагрузки. Согласно сделанным выводам, расслоение испытуемого образца носит скачкообразный характер. В связи с этим, наблюдение процесса деградации токонесущей способности под действием внешней поперечной механической

нагрузки практически не реализовано, за исключением двух особых случаев. Два указанных эксперимента анализируются отдельно, с привлечением данных по ранее опубликованному методу численного моделирования процесса расслоения. В соответствии с приведенной моделью, геометрия припоя может существенным образом влиять на процесс расслоения ВТСП-ленты. Таким образом, указанные экспериментальные результаты являются частным случаем реализации означенной численной модели, и не являются ошибочными.

Далее приводятся результаты испытаний ВТСП-лент с приложением продольной внешней механической нагрузки. На представленных зависимостях критического тока образцов от механической нагрузки отчетливо наблюдается характер деградации токонесущей способности. В отдельных случаях проведено циклическое нагружение образцов с целью установить их усталостные характеристики.

Диссертант провел анализ существующей математической модели поведения высокотемпературного сверхпроводника под действием механической нагрузки. Был сделан вывод о частичном совпадении полученных экспериментальных результатов с численной моделью.

Полученные диссертантом результаты являются новыми. Впервые в России разработаны, изготовлены и исследованы современные конструкции, сверхпроводящих ТНЭ, разработана технология изготовления высокоточных токонесущих элементов, сформулированы рекомендации по изготовлению устройств из высокоточных токонесущих элементов. Созданы методики численного моделирования тепловых процессов в токонесущих элементах.

Практическая значимость работы очевидна, поскольку все исследования и разработки направлены на решение практических задач по созданию перспективных крупномасштабных сверхпроводящих устройств как низкотемпературных, так и на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения.

Личный вклад автора работы известен научному сообществу. Все основные результаты диссертации получены либо полностью автором, либо при его непосредственном участии. Он проводил необходимые прочностные и тепловые расчеты при проектировании экспериментальных установок. Принимал непосредственное участие в изготовлении и сборке установок, активное участие в проведении экспериментов. Лично проводил анализ полученных результатов.

Представленный автореферат диссертации соответствует.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Результаты, полученные диссертантом и выносимые на защиту, являются новыми и имеют практическую ценность, и это четко достаточно сформулировано в автореферате. А вот в тексте диссертации эти формулировки в явном виде отсутствуют, что вызывает недоумение.

2. Из автореферата и текста диссертации не совсем понятно, каким образом обеспечивается синхронное перемещение большого числа гидравлических домкратов в испытательной машине. Очевидно, что такие меры были приняты, иначе при механических испытаниях происходил бы значительный перекося испытываемых образцов. Не очевидно, что давление масла в гидравлическом тракте однозначно соответствует усилию на образце.

3. Основные производители ВТСП-проводников ограничивают допустимую температуру пайки величиной в 200 °С. В диссертации делается вывод о недопустимости подобного нагрева образцов при подготовке испытания, однако подробностей по этому вопросу не приводится.

4. Количество циклов при испытаниях ВТСП-лент с продольным приложением нагрузки недостаточен для однозначного вывода об обратимости деградации токонесущей способности. Уместнее использовать термин «частичная обратимость».

Отмеченные недостатки не снижают в целом высокий уровень работы. Приведенные замечания скорее являются рекомендациями и пожеланиями по дальнейшей работе в данном направлении.

Автор в данной работе достиг поставленных целей, получил новые и полезные результаты, проявил высокую квалификацию исследователя и экспериментатора. Исходя из сказанного выше, считаю, что диссертация Диева Д.Н. *«Исследования низкотемпературных физико-механических свойств элементов конструкции проводов на основе Nb_3Sn и ВТСП-лент второго поколения»*, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Диев Д.Н. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Отзыв составил доктор технических наук, Директор научного направления – заведующий Отделением сверхпроводящих проводов и кабелей Всероссийского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности:



ВЫСОЦКИЙ В.С.

111024, г. Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, (499)-670-96-05, (985)-766-26-34; vysotsky@ieee.org

Подпись В.С. Высоцкого удостоверяю
Ученый секретарь секции Сверхпроводящие Провода и Кабели
Научно Технического Совета ОАО «ВНИИКП»,
ведущий научный сотрудник



ПОТАНИНА Л.В.

Открытое акционерное общество Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности Москва, 111024, Шоссе Энтузиастов д. 5, (495) 678-0216, e-mail: vniikp@vniikp.ru