

*На правах рукописи*

ДИЕВ Дмитрий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ВТСП-ЛЕНТ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ И ОБОЛОЧЕК КАБЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ Nb<sub>3</sub>Sn

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

**КЕЙЛИН** - доктор технических наук, профессор, заслуженный  
Виктор Ефимович деятель науки Российской Федерации, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**АВДИЕНКО** - доктор технических наук,  
Александр Андреевич АО «Русский сверхпроводник», Москва,  
научный руководитель

**ВЫСОЦКИЙ** - доктор технических наук,  
Виталий Сергеевич Всероссийский научно-исследовательский институт  
кабельной промышленности, Москва,  
директор научного направления – заведующий  
Отделением

**ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ** - АО «Высокотехнологический научно-  
исследовательский институт неорганических  
материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,  
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А. В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Решенные в рамках работы задачи имеют непосредственное отношение к наиболее передовым проектам в области электроэнергетики.

В частности, механические испытания оболочек проводника на основе  $Nb_3Sn$  проводились в рамках проекта создания международного термоядерного реактора ИТЭР. В процессе изготовления, транспортировки и установки кабель подвергается воздействию большого числа различных механических воздействий, Ремонт или замена провода на крупногабаритных установках может быть затруднена (а в случае ИТЭР ремонт практически невозможен), Поэтому необходимы предварительные механические испытания полномасштабных образцов элементов конструкции проводника для крупногабаритных сверхпроводниковых магнитов.

Исследования механических свойств ВТСП-лент второго поколения обладают высокой степенью актуальности ввиду быстрого развития направления и относительно малого числа работ по данной теме. Кроме того, изучение влияния механических нагрузок на ВТСП-ленты особенно важны для проектирования любых крупных устройств на основе ВТСП: магнитов для ускорителей, систем индукционного накопления энергии, двигателей и сильнополевых магнитов. В процессе работы подобных устройств элементы их конструкции подвергаются воздействию механических нагрузок, часто нестационарных. Изучение реакции проводника на механическое воздействие является необходимым для успешного развития прикладной высокотемпературной сверхпроводимости.

### **Цель диссертационной работы**

1. Разработка методик, проектирование и создание испытательных устройств для проведения механических испытаний труб-оболочек сверхпроводящего кабеля магнитной системы тороидального поля ИТЭР в диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого гелия в соответствии с международными стандартами ASTM и ASME.
2. Исследование процесса деградации токонесущей способности ВТСП-лент второго поколения и их спаев под действием поперечной и продольной механических нагрузок. Создание необходимых испытательных устройств и методик.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора в получение представленных научных результатов является

определяющим. Автор является соавтором конструкции машины для проведения криогенных механических испытаний и соответствующих методик. Автором проведены все прочностные и тепловые расчеты элементов означенной испытательной машины. Автор принимал непосредственное участие в процессах изготовления, сборки и монтажа машины, а также проведении испытаний и обработке полученных результатов. Автор является разработчиком стенов для механических испытаний ВТСП-лент второго поколения и соответствующего методического материала. При прямом участии автора получены экспериментальные результаты по ВТСП-лентам и их обработка. Отдельно автором проведен анализ полученной опытным путем информации и ее сравнение с существующими экспериментальными результатами и расчетными моделями.

### **Научная новизна**

Разработана и создана испытательная установка для проведения механических испытаний при температуре до 4,2 К с усилиями до 450 кН, являющаяся на данный момент уникальной. Достоверность полученных на созданной установке экспериментальных результатов подтверждена международной командой ИТЭР. Проведенные исследования механических свойств ВТСП-лент, особенно процесса их расслоения, значительно обогащают имеющиеся по этому вопросу данные. Проведена оценка полученных экспериментальных результатов с точки зрения существующих расчетных моделей.

### **Научная и практическая ценность**

Результаты, полученные при криогенных механических испытаниях труб-оболочек, повлияли на выбор поставщика материала труб и позволили квалифицировать технологии, используемые при производстве провода. В частности, была определена наилучшая методика сварки секций оболочки между собой, производимая российской стороной проекта ИТЭР. Испытательная машина прошла поверку, получен соответствующий сертификат ФГУ Ростест-Москва. Необходимо отметить, что на установке, при минимальной модернизации, можно проводить испытания схожих по габаритным размерам образцов любого профиля. Результаты исследований ВТСП-лент позволяют рассчитать критические параметры для создаваемых устройств с учетом влияния внутренних механических напряжений. Полученные результаты следует учитывать при выборе технологии производства обмотки: типе межвитковой изоляции, пропитке компаундом и т. д.

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

1. Разработка и создание уникального оборудования и методик измерения механической прочности труб-оболочек для проводов магнитной системы тороидального поля ИТЭР при температурах до 4,2 К и усилиях до 450 кН.
2. Проведение механических испытаний труб-оболочек в широком диапазоне температур с приложенным усилием до 450 кН.
3. Изучение физико-механических свойств и процесса расслоения ВТСП-лент второго поколения под действием внешних поперечных механических напряжений.
4. Исследование процесса деградации токонесущей способности ВТСП-лент и их паяных соединений в зависимости от действия продольных механических напряжений.
5. Анализ полученных в рамках работы данных по физико-механическим свойствам ВТСП.

### **Апробация диссертационной работы**

Материалы, изложенные в настоящей работе, докладывались и обсуждались на международных конференциях по криогенной технике и криогенным материалам СЕС-ICMS (два доклада: в 2011 и 2013 годах), международной конференции «Нанотехнологии функциональных материалов 2012», Вторых московских чтениях по проблемам прочности материалов. По материалам проведенной работы опубликовано 5 статей, из них 3 в рецензируемых журналах опубликовано.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, в которых представлены результаты работы. Общий объем диссертации составляет 102 страницы, содержит 46 рисунков и список литературы, насчитывающий 63 пункта.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложена постановка задач, решению которых посвящена работа, сформулированы положения, выносимые на защиту. Дается краткая характеристика актуальности тематики работы.

**В первой главе** выполнен обзор публикаций по тематике настоящей диссертации. Рассматриваются существующие методы проведения механических испытаний. Анализируются основные типы конструкций испытательных машин и криогенных установок, пригодных для проведения испытаний с требуемыми параметрами. Рассмотрен ряд отечественных и зарубежных патентов на криогенные испытательные установки, сделаны выводы о

конструкторских решениях, пригодных для достижения целей, сформулированных для настоящей диссертации. Анализируются преимущества и недостатки систем различных способов охлаждения исследуемых образцов.

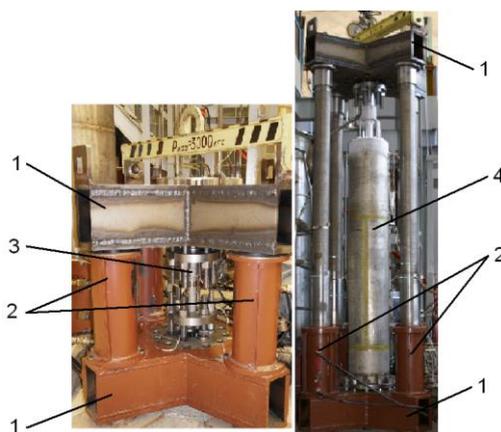
Проведен обзор существующих методов исследований механических свойств ВТСП-лент второго поколения. Рассмотрен вопрос о максимально возможном приближении метода исследования к фактическим условиям использования проводника. Дано краткое описание влияния внутренних механических нагрузок на работу сверхпроводниковых устройств. Приведены результаты исследований влияния термоциклирования компаундированной обмотки на снижение критического тока модельного ВТСП-магнита. Даны общие оценки целесообразности применения выбранных в диссертационной работе методов исследования.

**Вторая глава** посвящена описанию разработки и создания экспериментальной установки для проведения криогенных механических испытаний усилием до 450 кН.

В качестве труб-оболочек проводника катушек тороидального поля ИТЭР используются трубы круглого сечения из нержавеющей стали 316 LN. Диаметр необработанной трубы в состоянии поставки – 48 мм, толщина стенки – 1,9 мм. В процессе сборки проводника сверхпроводниковый кабель затягивается в оболочку, которая обжимается вальцами до диаметра 43,7 мм (процесс компактирования). На финальной стадии создания кабеля он проходит диффузионный отжиг для образования сверхпроводящего соединения  $Nb_3Sn$ . Единичная длина кабеля – 760 м, оболочка состоит из сваренных друг с другом участков по 10 м.

Дается описание непосредственно образцов, а также требований к ним. Ориентировочное усилие разрыва образца — около 200 кН при комнатной температуре и 400 — 450 кН при температуре жидкого гелия. В настоящей работе испытывались трубы производства Kobe Steel Ltd. (далее KST) и Sandvik AB. В частности, одной из целей работы было определение поставщика для ИТЭР.

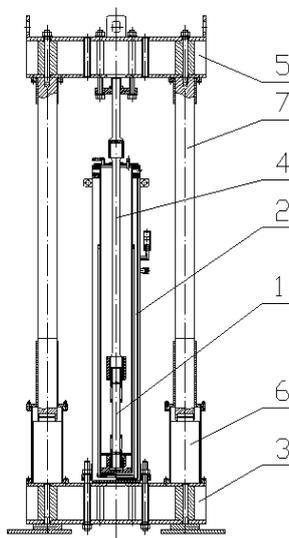
Приводится общее описание принципов действия испытательной установки в вариантах для испытаний при комнатной температуре и криогенных испытаниях. Фотографии обеих модификаций испытательной установки приведены на рисунке 1.



*Рисунок 1. Модификации испытательной установки для проведения испытаний при комнатной (слева) и криогенной (справа) температурах*

Основой обеих конфигураций установки является система из двух массивных крестовин (1) и четырех гидравлических домкратов (2). Вариант для проведения испытаний при комнатной температуре представляет собой систему закрепления образца (3) на крестовинах. Модификация для криогенных испытаний включает погружной криостат (4), передающий усилие на образец через корпус, и ряд сопутствующих элементов. Приводятся аргументы в пользу выбранных схем для проведения испытаний. Выполнены подробный прочностной и оценочный тепловой расчеты элементов как самого криостата, так и крепежа образца.

Схема установки в варианте для криогенных механических испытаний приведена на рисунке 2. Ниже дано краткое описание процесса испытаний.



*Рисунок 2. Схема испытательной установки в варианте для проведения криогенных испытаний*

Образец (1) с установленными датчиками деформации и температуры закрепляется в криостате (2). Криостат, в свою очередь, жестко зафиксирован на нижней крестовине рамы испытательной машины (3). Образец через шток (4) закреплен на верхней крестовине (5) рамы. Механическая нагрузка на образце создается за счет перемещения верхней рамы с помощью гидравлических домкратов (6) и толкателей (7). В процессе подготовки испытания в криостат заливается жидкий азот для предварительного захлаживания образца. После установления теплового равновесия, азот удаляют и производят заливку жидкого гелия. В процессе испытания поддерживается постоянный уровень хладагента.

Испытания при комнатной температуре проводятся по схожей методике, с той разницей, что закрепление образца производится непосредственно на раме испытательной машины.

В третьей главе приводятся полученные экспериментальные результаты. В силу большого количества проведенных экспериментов, для испытаний при комнатной температуре приводятся наиболее типичные результаты (рисунок 3 и таблица 1).

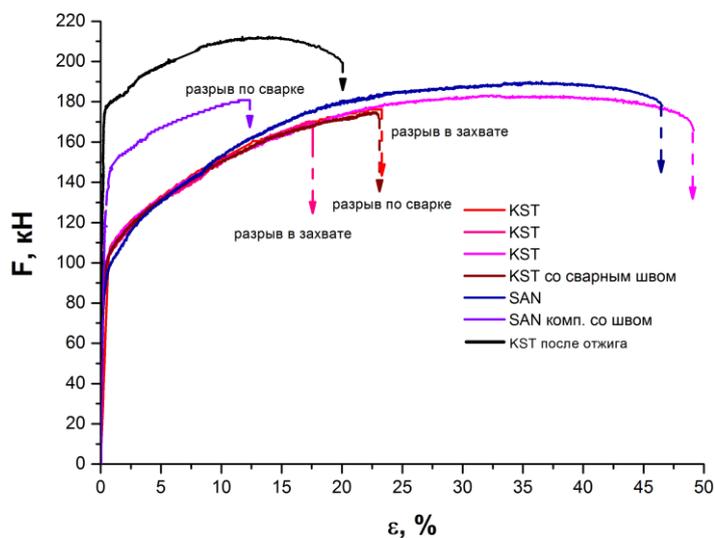


Рисунок 3. Результаты механических испытаний труб-оболочек при комнатной температуре

Образец	$F_{\max}$ , кН	$\epsilon_{\max}$ , %
KST-1	182	49
KST-2	176	23 (разрыв в крепеже)
KST-3	170	17 (разрыв в крепеже)
KST-4 (сварной шов)	175	23 (разрыв по сварному шву)
KST-5 (отжиг)	211	20
Sandvik-1	189	46
Sandvik-2 (компактированный, сварной шов)	180	12 (разрыв по сварному шву)

Таблица 1. Результаты испытаний труб-оболочек при комнатной температуре

По результатам проведенных испытаний определены средние усилия разрыва для различных образцов труб, а также средние значения деформации. Установлено, что наличие сварного шва снижает пластические свойства труб-оболочек (особенно для материала в состоянии поставки). Полученные экспериментальные данные были использованы при выборе поставщика труб-оболочек для ИТЭР.

В рамках работы проведены испытания при температуре жидкого гелия. С учетом испытаний при комнатной температуре испытывались образцы труб производства Kobe Special Tube, выбранной в качестве фирмы-поставщика. Установлено пороговое значение осевого усилия, которое гарантированно не разрушает сварной шов на образце, определена деформация

при этом усилии.

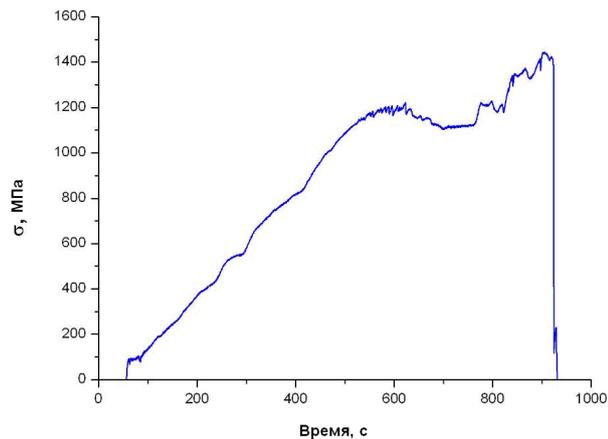


Рисунок 4. Результат криогенных механических испытаний трубы-оболочки в состоянии поставки

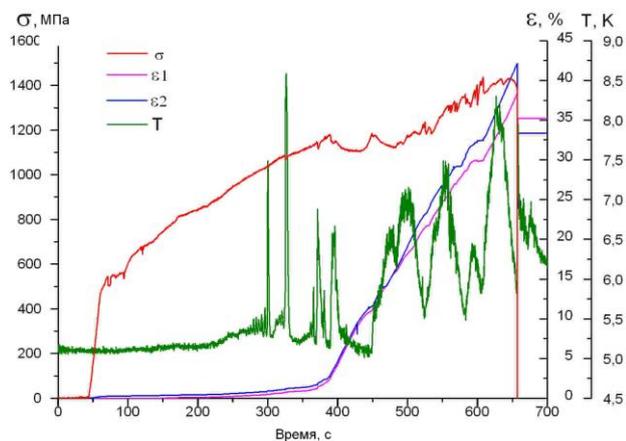


Рисунок 5. Результат криогенных механических испытаний трубы-оболочки в состоянии поставки со сварным швом

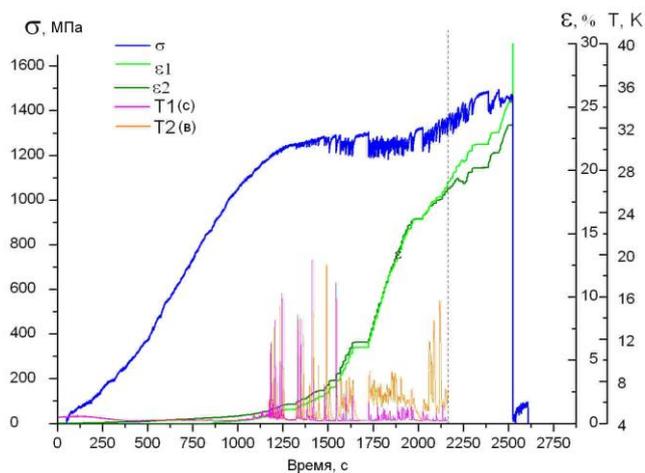
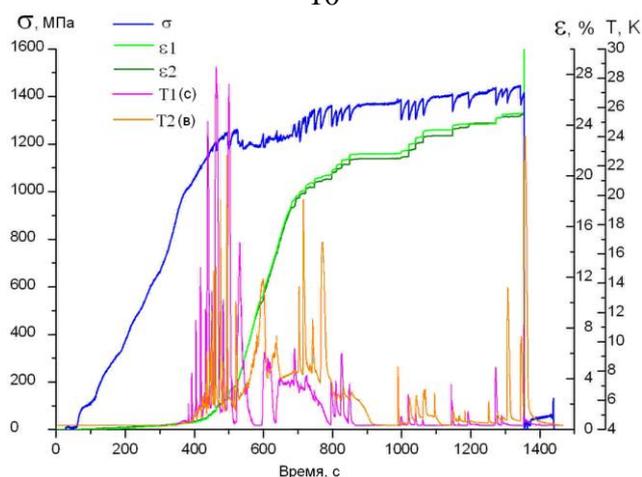


Рисунок 6. Результат криогенных механических испытаний трубы-оболочки, прошедшей процедуры компактирования и отжига



*Рисунок 7. Результат криогенных механических испытаний трубы-оболочки со сварным швом, прошедшей процедуры компактирования и отжига*

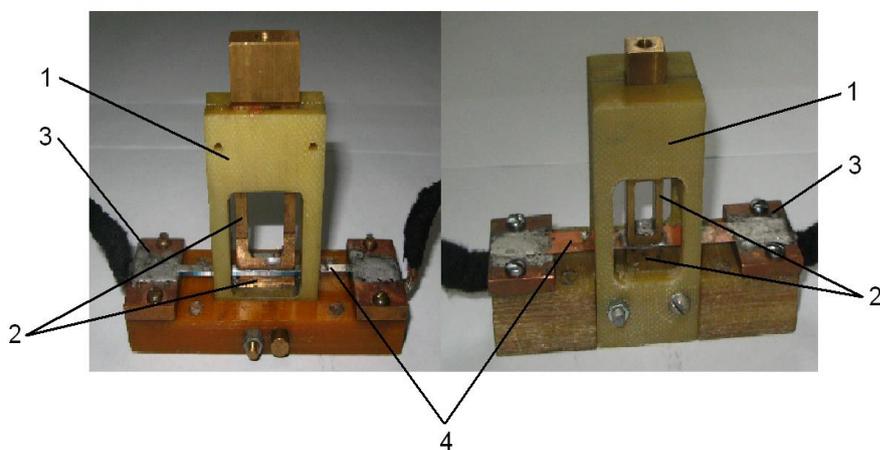
На графиках нагружения видна скачкообразная деформация образца. Процесс пластического растяжения сопровождается пиковым возрастанием температуры (до нескольких десятков градусов), что подтверждает правильность выбора системы охлаждения (релаксация температуры занимает не более 2 с). Следует отметить, что при криогенных температурах, наличие сварного шва мало влияет на пластические свойства образца. Это особенно заметно для труб, прошедших процедуры компактирования и отжига (рисунки 6 и 7 — деформация 25% и 24,5% соответственно). Еще одним важным результатом является схожесть кривых нагружения всех четырех образцов (начало пластической деформации при напряжениях около 1200 МПа, напряжение разрыва около 1400 МПа).

**Четвертая глава** состоит из двух частей: первая посвящена экспериментальному исследованию механических свойств ВТСП-лент с приложением поперечной механической нагрузки, вторая — исследованию свойств лент при продольном растяжении и полученным результатам.

ВТСП-ленты второго поколения представляют собой плоские многослойные композитные провода, покрытые защитным слоем из серебра и медным электростабилизатором. ВТСП-ленты от разных производителей различаются способами нанесения сверхпроводника на подложку, технологией нанесения медного стабилизатора, составом буферных слоев, а также геометрическими размерами. В настоящей работе использовались образцы лент производства SuperPower (сверхпроводящий слой на основе GdBCO, нанесенного методом осаждения из газовой фазы на подложку из хастеллоя (50 мкм) с буферными слоями, сформированными по технологии ионного напыления, напыленный медный стабилизатор толщиной 25 мкм, ширина проводника 4 мм, общая толщина — 0,1 мм) и American Superconductor — далее AMSC (сверхпроводящий слой на основе YBCO, нанесенного по технологии осаждения

металлоорганических соединений на подложку, обработанную по методу биаксиального текстурирования с помощью прокатки, стабилизатор из луженой медной фольги припаян с обеих сторон ленты, ширина проводника составляет 4,8 мм, общая толщина - 0,2 мм).

Для проведения исследований разработано и изготовлено несколько устройств: два для экспериментов с приложением нагрузки на расслоение, одно для экспериментов с приложением продольной механической нагрузки. Приводится детальное описание конструкции устройств для проведения испытаний на расслоение лент шириной 4 и 12 мм (см. рисунок 8). Устройства представляют собой стеклотекстолитовые рамки (1), снабженные двумя латунными наковальнями (2) и двумя тоководными пластинами (3). Образец (4) запаивается между наковальнями (нижняя закреплена на раме неподвижно, верхняя перемещается по вертикали) и припаивается к тоководным пластинам. Устройство размещается в погружном азотном криостате. Подвижная наковальня закрепляется на датчике нагрузки испытательной машины через шток. В работе приводится полная схема закрепления устройств в криостате и на испытательной машине. Проведена оценка прочности отдельных элементов стенда. В связи с тем, что значение усилия относительно невелико (до 3,5 кН), размеры элементов устройств при проектировании определялись, исходя из удобства эксплуатации. Была рассчитана максимально допустимая нагрузка для выбранной геометрии деталей.



*Рисунок 8. Фотографии устройств для исследований влияния поперечной механической нагрузки на свойства ВТСП-лент*

В процессе работы использовались различные типы припоя: сплав Розе, оловянно-висмутый припой, ПОСК 50-18, сплав Вуда. Во всех случаях использовался неактивный флюс-гель ТТ на основе тетроэтиленгликоля. Приводится подробное описание экспериментов по выбору наиболее подходящего припоя. По результатам, наиболее подходящим для использования в данной работе являлся сплав Вуда.

Приводится краткое описание метода испытаний. После установки криостата с образцом

на раму испытательной машины и подключения источника тока и измерительного оборудования производится заливка жидкого азота. После установления теплового равновесия производится измерение критического тока образца при нулевой механической нагрузке. Затем шток закрепляется на датчике нагрузки испытательной машины. Усилие на образец подается ступенчато, с шагом 100 — 200 Н. На каждом шаге измеряется критический ток образца. Увеличение механической нагрузки производится либо до существенного падения критического тока (до 30% от начального значения), либо до разрушения образца, определяемого по резкому уменьшению нагрузки (как правило, сопровождаемому характерным звуком).

В разделе, посвященном результатам, приводится ряд экспериментальных зависимостей нормированного критического тока образца ВТСП-ленты от поперечной механической нагрузки (рисунки 9 и 10). В большинстве проведенных экспериментов процесс расслоения происходил скачкообразно, при этом существенной деградации токонесущей способности не наблюдалось.

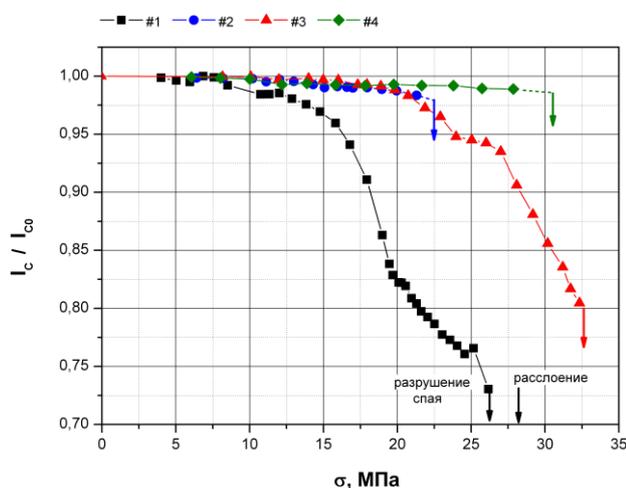


Рисунок 9. Результаты механических испытаний ВТСП-лент SuperPower

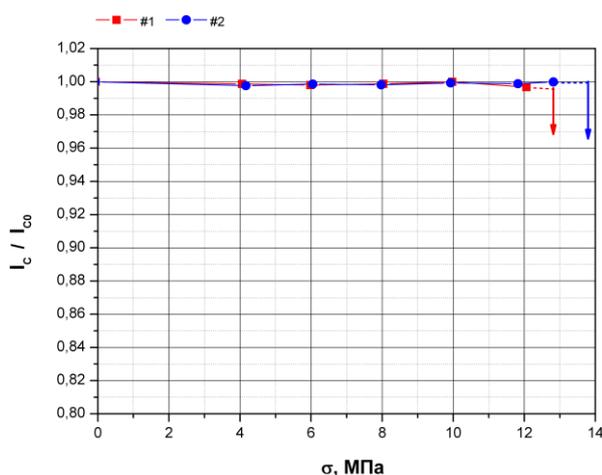


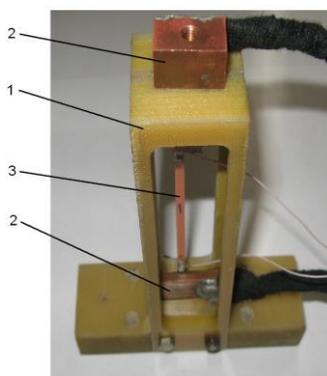
Рисунок 10. Результаты механических испытаний ВТСП-лент AMSC

Тем не менее, в двух случаях характер полученных результатов существенно отличался. На полученных графиках (рисунок 9, графики 1 и 3) наблюдается ярко выраженное снижение

критического тока. Данное отклонение может быть вызвано отличиями в условиях проведения эксперимента.

Это предположение подтверждается существующей численной моделью, общее описание и анализ которой приводится в следующей части главы. В частности, авторами модели установлено, что, в зависимости от геометрии спая, график распределения нагрузки внутри ВТСП-ленты может быть как плавным, так и иметь пиковые значения, соответствующие концентраторам напряжения. В последнем случае, велика вероятность возникновения и развития трещины, по которой начнется расслаивание образца. При этом процесс, скорее всего, будет идти постепенно, что позволит наблюдать потерю образцом сверхпроводящих свойств. Таким образом, наблюдается согласование аналитических и экспериментальных результатов.

Во второй части главы описаны исследования механических свойств ВТСП-лент второго поколения и их паяных соединений под воздействием продольной механической нагрузки. Приводится детальное описание соответствующего устройства. Последнее разрабатывалось с учетом опыта создания стенда для испытаний с поперечным приложением силы. В связи с этим, часть деталей обеих конструкций является взаимозаменяемой. Фотография устройства приведена на рисунке 11. Устройство представляет собой стеклотекстолитовую рамку (1) с двумя медными тоководными пластинами (2), также используемыми в качестве силовых элементов. Нижняя пластина закреплена на рамке жестко, верхняя перемещается по вертикали. Закрепление образца (3) в устройстве производится посредством припайки к пластинам с использованием сплава Вуда. Устройство устанавливается в погружной азотный криостат, верхняя пластина закрепляется на датчике нагрузки испытательной машины посредством штока.



*Рисунок 11. Фотография устройства для исследований реакции ВТСП-лент на воздействие продольной механической нагрузки*

Методически эксперименты с приложением продольной механической (как для лент, так и для их спаев) нагрузки практически идентичны испытаниям на расслоение. В диссертации приведена пошаговая инструкция по припайке образца к соответствующим элементам

устройства, размещения его в криостате и закреплению на испытательной машине. Дано описание режимов нагружения и измерения критического тока образца.

В последней части четвертой главы приведены полученные экспериментальные результаты и их анализ. Установлено, что в среднем для лент SuperPower (ширина 4 мм, толщина 0,1 мм) усилие полной потери токонесущей способности лежит в диапазоне от 320 до 350 Н. При этом механическая нагрузка порядка 250 Н вызывала падение критического тока ленты на 8 – 10%. При возрастании усилия от нуля до 150 – 200 Н наблюдается квазилинейное снижение нормированного критического тока от 100% до 95 %.

Результаты по лентам AMSC (ширина 4,8 мм, толщина 0,2 мм) качественно совпадали с результатами, полученными при испытаниях лент SuperPower. Численные показатели при этом отличались. Так, значения усилия потери токонесущей способности лент AMSC лежат в диапазоне от 400 до 430 Н (разрушение ленты при 450 — 500 Н). Падение критического тока на 5% (квазилинейный участок) достигается на нагрузках в 300 – 350 Н.

Необходимо отметить, что квазилинейная потеря токонесущей способности является частично обратимым процессом. В частности, в отдельных экспериментах производилась циклическое нагружение в диапазоне усилий от 200 - 250 Н (что соответствует началу резкого снижения токонесущей способности) до 50 Н (нагрузка не снижалась до нулевого значения с целью сохранения натяжения образца). В процессе циклического нагружения установлено, что при малом числе циклов (до 10) лента не подвергается усталостному разрушению. Также установлено, что снижение критического тока на 4 — 5% (точнее — до начала лавинообразного процесса деградации) является обратимым.

Результаты, полученные при испытаниях спаев лент показывают, что по прочностным характеристикам спаи практически идентичны лентам, но токонесущая способность спаев под воздействием механической нагрузки деградирует быстрее. Отметим, что большинство испытаний проводилось с лентами SuperPower.

Проведено сопоставление полученных экспериментальных результатов с существующей расчетной моделью. Согласно этой модели, ВТСП-слой рассматривается как двумерная структура с тремя типами центров пиннинга для вихрей Абрикосова:  $a$ ,  $b$  и  $ab$  (статистически равнозначными при отсутствии деформации). В силу симметрии структуры ВТСП-слоя, предполагается, плотность распределения вероятности закрепления вихря для центров тип  $ab$  не зависит от деформации, тогда как соответствующие плотности для центров  $a$  и  $b$  под действием деформации изменяются на одну и ту же величину противоположным образом. В качестве условия равновесия взято равенство суммы сил пиннинга по всем центрам и силы Лоренца для сверхпроводника в собственном поле. Из этого условия авторами модели получено выражение для плотности тока ВТСП-слоя как функции деформации. Анализ этого выражения

позволяет получить качественную зависимость критического тока от продольной деформации. С учетом того, что процесс деградации токонесущей способности происходит на линейном участке кривой нагружения (т.е. деформация прямо пропорциональна механической нагрузке), эта зависимость совпадает с полученными экспериментальными данными с точностью до подгоночных коэффициентов.

### **Заключение**

1. Разработана, создана и испытана экспериментальная установка для проведения механических испытаний труб-оболочек. Установка выполнена в двух вариантах: с максимальным усилием до 200 кН при комнатной температуре и с максимальным усилием до 450 кН при криогенных температурах до 4,2 К. Отдельные технологические решения, использованные в конструкции испытательной установки, были зарегистрированы в качестве коммерческого ноу-хау. Испытательная машина прошла поверку, получен соответствующий сертификат ФГУ Ростест-Москва.
2. Разработаны методики проведения механических испытаний труб-оболочек при криогенной и комнатной температуре. Проведен ряд испытаний труб-оболочек провода магнитной системы тороидального поля ИТЭР. Полученные экспериментальные результаты обладают высокой практической пользой. По результатам проведенных испытаний был выбран поставщик труб-оболочек для ИТЭР, проведена отработка процедуры сварки секций обмотки магнитной системы тороидального поля.
3. Разработаны устройства для проведения исследований зависимости критического тока ВТСП-лент от поперечной механической нагрузки. Создана методика проведения механических испытаний ВТСП-лент с приложением механической нагрузки на расслоение. Проведен ряд экспериментов с ВТСП-лентами разных производителей. Получены экспериментальные результаты, согласующиеся и дополняющие существующие данные по этой тематике.
4. Разработано устройство для проведения исследований зависимости критического тока ВТСП-лент от продольной механической нагрузки на растяжение. Создана методика проведения исследований. Проведен ряд экспериментов с ВТСП-лентами разных производителей. Получены экспериментальные результаты, согласующиеся и дополняющие существующие данные по этой тематике.
5. Проведен анализ экспериментальных зависимостей критического тока ВТСП-лент от приложенной механической нагрузки относительно существующих теоретических моделей. Установлено качественное совпадение данных, полученных опытным и аналитическим путем.

**Основные результаты** настоящей диссертации опубликованы в следующих работах:

1. D.N. Diev, O.P. Anashkin, V.E. Keilin, A.V. Kryvikh, A.V. Polyakov, V.I. Shcherbakov Delamination tests of 2G HTS tapes at room and liquid nitrogen temperatures// *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 60, Book Series: AIP Conference Proceedings Volume 1574, 2014, pp. 245-251
2. O.P. Anashkin, V.E. Keilin, A.V. Kryvikh, D.N. Diev, A.S. Dinisilov, V.I. Tronza Tensile tests of ITER TF conductors jacket materials// *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 58, Book Series: AIP Conference Proceedings Volume 1435, 2012, pp. 117-124
3. А.В. Кривых, О.П.Анашкин, В.Е. Кейлин, Д.Н. Диев, А.С. Динисилов, В.И. Щербаков, В.И. Тронза Механические испытания труб-оболочек проводника для тороидальной обмотки Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР)// *ЖТФ*, т. 82, в. 11, 2012г, стр. 99-105.
4. Д.Н. Диев, О.П. Анашкин, В.Е. Кейлин, А.В. Кривых, В.И Щербаков Деформации труб-оболочек из стали 316 LN при температуре жидкого гелия// Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ 2012), стр. 207-211.
5. А. В. Кривых, О. П.Анашкин, В. Е. Кейлин, Д. Н. Диев, А. С. Динисилов, В. И. Щербаков, В. И. Тронза, «Механические испытания труб-оболочек проводника для тороидальной обмотки ИТЭР», препринт ИАЭ 6674-10, 2011.