

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ»

На правах рукописи

ДИЕВ Дмитрий Николаевич

**Исследование низкотемпературных физико-механических свойств ВТСП-
лент второго поколения и оболочек кабелей на основе Nb₃Sn**

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

Кейлин Виктор Ефимович

доктор технических наук, профессор

Москва - 2015

Содержание

Введение.....	4
ГЛАВА 1.....	6
Обзор литературы.....	6
ГЛАВА 2.....	22
Разработка, изготовление и тестирование установки для криогенных механических испытаний.....	22
2.1 Оценка параметров разрабатываемой установки.....	23
2.2 Описание силовых элементов испытательной машины. Расчеты крепежных элементов для проведения испытаний при комнатной температуре.....	28
2.3 Методика проведения испытаний при комнатной температуре.....	34
2.4 Разработка криостата для проведения испытаний при криогенных температурах.....	35
2.5 Расчет внутренней обечайки криостата.....	37
2.6 Расчет внешней обечайки криостата.....	40
2.7 Расчет резьбового терминала.....	41
2.8 Выбор системы захвата образца. Прочностные расчеты захватов.....	43
2.9 Расчет крепежного штока.....	45
2.10 Расчет элементов для закрепления криостата на силовой раме испытательной машины.....	46
2.11 Оценка расхода хладагента.....	48
2.12 Методика проведения испытаний при температуре жидкого гелия.....	50
2.13 Проведение тестового испытания при температуре жидкого азота.....	52
ГЛАВА 3.....	55
Результаты испытаний и их анализ.....	55

3.1 Результаты испытаний труб-оболочек при комнатной температуре.....	55
3.2 Результаты испытаний труб-оболочек при температуре жидкого гелия.....	57
ГЛАВА 4.....	65
Разработка методов исследований физико-механических свойств ВТСП-лент второго поколения.....	65
4.1 Разработка устройств для проведения испытаний ВТСП-лент с приложением поперечной механической нагрузки.....	65
4.2 Разработка устройства для проведения испытаний ВТСП-лент с приложением продольной механической нагрузки.....	70
4.3 Описание технологии пайки.....	71
4.4 Методика испытаний ВТСП-лент с приложением механической нагрузки поперечной механической нагрузки.....	73
4.5 Методика испытаний ВТСП-лент с приложением продольной механической нагрузки.....	76
4.6 Результаты испытаний ВТСП-лент на расслоение.....	77
4.7 Анализ полученных результатов. Сравнение их с существующей численной моделью.....	84
4.9 Анализ полученных экспериментальных результатов.....	95
Заключение.....	98
Список работ, опубликованных по теме диссертации.....	100
Список использованной литературы.....	101

Введение

Данная работа посвящена разработке экспериментальной и методической базы для исследований физико-механических свойств высокотемпературных сверхпроводников и оболочек сверхпроводниковых кабелей, главным образом, при температуре жидкого азота и жидкого гелия. Исследования механических свойств оболочек сверхпроводниковых кабелей выполнялись в рамках международного проекта по созданию крупнейшего экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР). Изучение физико-механических свойств ВТСП-лент второго поколения необходимо для применения этих лент в сверхпроводниковых сильноточных устройствах.

Основные задачи рассматриваемой диссертации формулируются следующим образом:

Разработка методической базы, проектирование и изготовление экспериментального оборудования и проведение механических испытаний труб-оболочек кабелей магнитной системы тороидального поля ИТЭР. Испытания должны быть проведены в соответствии с международными стандартами ASTM и ASME в диапазоне температур от 293 К до 4,2 К.

Разработка и изготовление экспериментального оборудования для изучения процесса деградации токонесущей способности ВТСП-лент второго поколения под воздействием продольных и поперечных механических нагрузок. Создание методической базы. Сравнение полученных результатов с расчетными моделями.

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, обладают научной новизной. Разработанная установка для криогенных испытаний труб-оболочек с усилием до 450 кН на момент создания являлась уникальной по своим возможностям. В настоящее время существуют единичные экземпляры

схожих по назначению и характеристикам установок, авторы которых ссылаются, в том числе, на результаты, описанные в данной работе и опубликованные в реферируемых журналах. Исследования поведения ВТСП-лент под воздействием механической нагрузки дополняют имеющиеся данные существенно новой информацией, новизна которой определяется тем, что условия проведения испытаний приближены к условиям работы ВТСП-лент в реальных сверхпроводниковых устройствах. Большое научное и практическое значение имеют результаты экспериментов по расслоению ВТСП-лент второго поколения.

На защиту выносятся следующие положения:

Разработка и создание уникального оборудования и методик измерения механической прочности труб-оболочек для проводников магнитной системы тороидального поля ИТЭР при температурах до 4,2 К и усилиях до 450 кН.

Проведение механических испытаний труб-оболочек в широком диапазоне температур с приложенным усилием до 450 кН.

Изучение физико-механических свойств и процесса расслоения ВТСП-лент второго поколения под действием внешних поперечных механических напряжений.

Исследование процесса деградации токонесущей способности ВТСП-лент и их паяных соединений в зависимости от продольных механических напряжений.

Анализ полученных данных по физико-механическим свойствам ВТСП.

ГЛАВА 1

Обзор литературы

В настоящей диссертации описана работа по изучению физико-механических свойств ВТСП-лент второго поколения и оболочек сверхпроводящих кабелей на основе низкотемпературных сверхпроводников.

Одной из распространенных схем применения низкотемпературных сверхпроводников для достижения высоких транспортных токов является кабель в оболочке: большое число сверхпроводниковых проводов затянута в металлическую трубу, выполняющую одновременно роль криогенного объема и защитного кожуха. Теоретически, существует возможность использования для создания подобных кабелей ВТСП-ленты. В настоящий момент существует ряд проектов по созданию сильноточных кабелей такого рода [1] – [4].

Основное применение кабели в оболочке находят в крупных сильноточных сверхпроводниковых установках. В частности, в магнитных системах международного термоядерного реактора ИТЭР [5], также они запланированы к применению в разрабатываемом реакторе DEMO [6].

Сверхпроводниковая магнитная система ИТЭР состоит из катушек разного типа: восемнадцати катушек тороидального поля, центрального соленоида (6 секций), шести катушек полоидального поля и девяти пар катушек корректирующего поля. Для создания магнитной системы используются кабели в оболочке различной архитектуры. Кабели отличаются друг от друга материалом сверхпроводящих жил (Nb_3Sn [7] для катушек тороидального поля и центрального соленоида, $NbTi$ для катушек полоидального и корректирующего полей), конфигурацией их расположения, материалом и геометрией оболочек.

Работы по производству компонентов магнитных систем, их тестированию и сборке были распределены между странами-участницами ИТЭР. Основные приемочные испытания проводились в Европе: испытания сверхпроводящих стрендов проводились в ЦЕРН, Швейцария [8], [9]. За механические испытания оболочек кабелей и сварных швов отвечал Технологический Институт Карлсруэ, Германия [10]. В институте ISQ (Португалия), проводился неразрушающий контроль оболочек и сварных швов. На рисунке 1 изображены различные кабели в оболочке, используемые в ИТЭР.

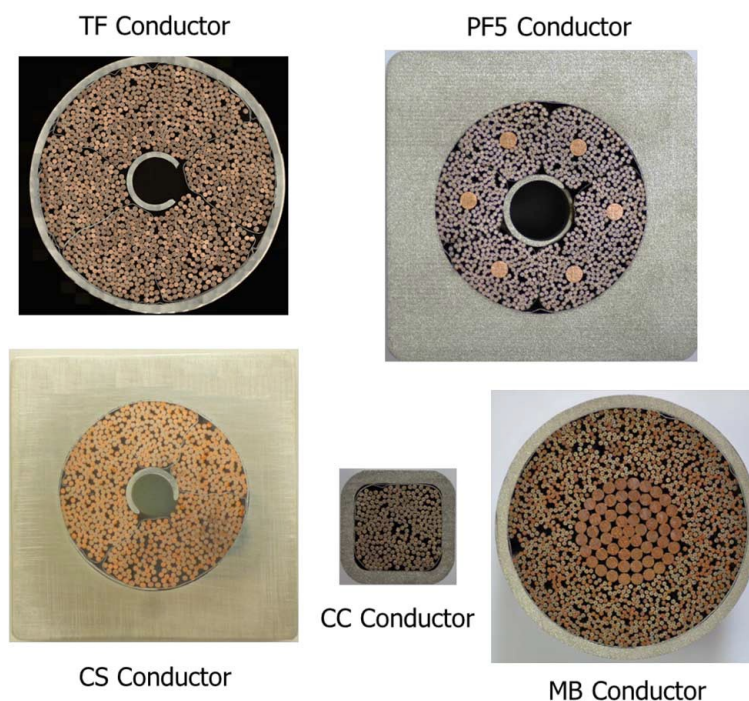


Рисунок 1. Поперечные сечения различных сверхпроводниковых кабелей в оболочке

В США проводились металлографические исследования стрендов и полноразмерных проводников (Флоридский Государственный Университет) [11], [12], а также исследования зависимости критического тока проводников от механической нагрузки и температуры (Национальный Институт Стандартизации и Технологий, Колорадо) [13]. Японским Агентством по

Атомной Энергетике проводились механические испытания оболочек кабелей центрального соленоида и катушек полоидального поля. В НИЦ «Курчатовский институт» были проведены механические и вакуумные испытания оболочек кабелей катушек тороидального поля, чему посвящена первая часть настоящей диссертации. Более подробная информация о проведении испытательных процедур и вкладе Российского Агентства ИТЭР изложена в [14] – [17].

Задача, рассмотренная в первой части настоящей работы сводится к разработке и созданию устройства для криогенных механических испытаний на растяжение и разрыв образцов труб-оболочек магнитной системы тороидального поля ИТЭР. При рассмотрении тематической литературы необходимо отдать приоритет работам, посвященным криогенным испытательным машинам, рассчитанным на большие усилия.

В целом, системы криогенного обеспечения можно разделить на два типа. В первом случае речь идёт об охлаждении испытуемого образца напрямую хладагентом (далее системы прямого охлаждения), во втором случае между образцом и хладагентом имеется теплообменник (далее системы косвенного охлаждения).

Рассмотрим подробнее системы прямого охлаждения. Основным преимуществом данного подхода является максимально эффективный отвод тепла от охлаждаемого образца. В машинах для механических испытаний обычно используется два вида таких систем — погружной и циркуляционный. В погружной системе, как следует из названия, образец погружен в резервуар с хладагентом, который постепенно выкипает. Периодически возможна подача дополнительных объемов охлаждающей жидкости, однако, образец не должен находиться в постоянном потоке — в этом отличие от циркуляционной системы охлаждения.

Рассмотрим системы погружного типа. В подобных системах, крепежные элементы для установки образца находятся внутри криогенной камеры. Такой подход упрощает конструкцию криостата, так как существенно уменьшает количество подвижных вакуумных уплотнений. Существенным недостатком данного типа конструкции являются сравнительно большой расход хладагента – особенно сильно это проявляется в системах, предназначенных для испытаний крупногабаритных образцов. Второй проблемой является технические сложности, связанные с захватом и удержанием образца при криогенных температурах. Эти сложности вызваны разностью в коэффициентах теплового расширения материалов образца и захвата, изменением коэффициента трения при понижении температуры (в случае фрикционного зажима).

Одним из вариантов циркуляционной системы охлаждения является устройство, описанное в патенте [18]. Система предназначена для испытаний образцов труб. Принцип работы заключается в теплоизоляции рабочей области образца и прокачке сквозь него жидкого хладагента. Зажимы образца при этом находятся при комнатной температуре.

Другим способом реализации системы прямого охлаждения является погружной криостат с силовым корпусом. В этом случае, криостат сам является силовым элементом конструкции испытательной машины. Такой подход позволяет сократить число «холодных» деталей к необходимому минимуму, но при этом вносит коррективы в конструкцию криостата.

Существенным недостатком систем прямого охлаждения является длительное время подготовки единичного испытания, поскольку замена образца требует отогрева криостата и крепежных деталей. Возможность замены образца без вскрытия и отогрева криостата могла бы сэкономить как время, так и хладагент. Такой механизм описан в патенте [19]. Автор патента предлагает использовать барабан с несколькими предустановленными

образцами. Подготовка нового испытания в этом случае сводится к повороту барабана и автоматическому закреплению нового образца в зажимах испытательной машины. Границы применимости подобного устройства определяются размерами образцов.

В целом, системы прямого охлаждения незаменимы для проведения испытаний при фиксированной рабочей температуре и необходимости быстрой нейтрализации температурных возмущений.

Системы косвенного охлаждения предполагают отвод тепла от образца через теплообменник. Последний же находится в непосредственном контакте с хладагентом. Существенным недостатком такого подхода является инертность системы — в случае возникновения температурных возмущений на образце, возврат к рабочей температуре займет большее время (относительно систем прямого охлаждения). Тем не менее, в ряде случаев подобные криогенные системы являются незаменимыми. Примером подобной системы может служить испытательная установка, описанная в [20], [21].

Вторая часть настоящей работы посвящена исследованию механических свойств высокотемпературных сверхпроводников, а именно – зависимости токонесущей способности от величины приложенной механической нагрузки.

В настоящее время производится и широко используется два поколения высокотемпературных сверхпроводников. Оба поколения обладают своими достоинствами, недостатками и границами применимости.

Первое поколение ВТСП – это провода с жилами на основе соединения висмута [22] вида $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$. При этом все производимые проводники условно разделяют на два типа [23]: Bi-2223 (по соотношению Bi:Sr:Ca:Cu как 2:2:2:3) и Bi-2212 (соответственно, по соотношению Bi:Sr:Ca:Cu как 2:2:1:2) [24] – [28]. Производство проводов на основе Bi-2223 представляет собой сложный многоступенчатый процесс. На первой стадии производится спекание порошкообразного прекурсора в серебряной трубке с последующей

вытяжкой для образования моножильного провода. Затем несколько одножильных проводов аналогичным образом (заключение в серебряную оболочку и протяжка) объединяются в многожильный провод. Многожильный провод многократно прокатывают вальцами до получения ВТСП-ленты. Механическая прочность подобного провода относительно низка (подробнее этот вопрос рассмотрен в [29] – [32]), поэтому, для дополнительного усиления, на ленты напаивают фольгу из нержавеющей стали или бронзы [33] – [35].

Критический ток ВТСП-лент первого поколения составляет порядка 160 – 180 А (при температуре жидкого азота в собственном магнитном поле) для массово производимых проводников длиной единичного отрезка до 1 км. Внешнее магнитное поле способно существенно снизить токонесущую способность лент первого поколения. В случае магнитного поля направленного параллельно поверхности проводника, его рост с 0,1 до 1 Тл вызовет падение критического тока примерно на 30 – 35%. Аналогичный рост магнитного поля, направленного перпендикулярно поверхности проводника, вызовет снижение критического тока более, чем на два порядка. В этом смысле первое поколение ВТСП существенно уступает второму.

Для применения в сильных внешних магнитных полях (в первую очередь – в ЯМР-спектрометрах) создаются провода круглого сечения на основе Bi-2212 в серебряной матрице [36], [37]. Производством ВТСП такого типа занимается компания Oxford Superconducting Technology [38].

Второе поколение высокотемпературных сверхпроводников представлено ленточными проводами на основе оксидов редкоземельных металлов (как правило, иттрий или гадолиний). Технологии производства ВТСП-лент второго поколения существенно различаются в зависимости от производителя. В настоящей диссертации описано исследование ВТСП-лент производства фирм SuperPower и American Superconductor (AMSC) [39], [40].

ВТСП-ленты AMSC производятся по технологии осаждения металлоорганических соединений на подложку, обработанную по методу биаксиального текстурирования. Стандартной практикой данного производителя является изготовление широкой ленты, с последующей нарезкой на провода требуемой ширины. Стабилизирующее медное покрытие наплавляется на обе поверхности ВТСП-ленты, торцы проводника при этом защищены слоем припоя.

SuperPower производит ленты по технологии осаждения сверхпроводника (GdBCO) из газовой фазы на подложку из хастеллоя с предварительно нанесенными буферными слоями. Последние формируют с применением технологии ионного напыления. Ленты покрывают (напыление) защитным серебряным и медным стабилизирующим слоями (нанесение последнего опционально, коммерчески доступны ленты с серебряным покрытием без стабилизатора). На рисунке 2 приведено схематичное изображение ВТСП-ленты второго поколения.

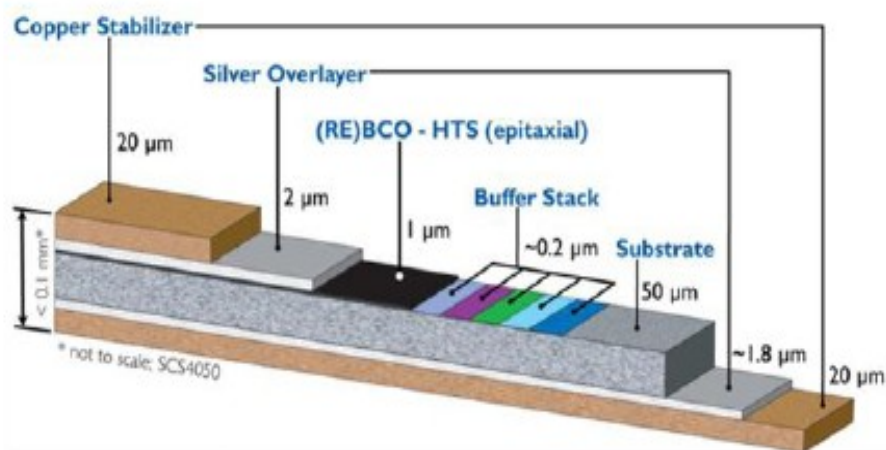


Рисунок 2. Схема конструкции ВТСП-ленты SuperPower

Данные ленты способны нести ток порядка 120 – 150 А при температуре жидкого азота в собственном магнитном поле. Ленты достаточно устойчивы к воздействию внешних магнитных полей, что позволяет использовать их для решения широкого круга прикладных задач. [41] – [46].

В настоящей работе описано две серии экспериментов – по исследованию воздействия на ВТСП-ленты поперечных и продольных механических нагрузок. Как было сказано выше, критические параметры высокотемпературных сверхпроводников существенным образом зависят от внешних механических воздействий. Это проявляется не только в случае сильноточных кабелей, но и в менее масштабных устройствах. В частности, существует проблема снижения значения критического тока обмоток ВТСП-магнитов при термоциклировании.

Данный эффект в наибольшей степени проявляет себя в обмотках, пропитанных эпоксидной смолой. В работе [47] приводятся результаты сравнительного анализа обмоток с пропиткой компаундом и без нее. Результаты показывают, что значение критического тока для пропитанных обмоток после нескольких захолаживаний может уменьшиться до 0,3 – 0,4 от аналогичного значения для сухих обмоток. При этом установлена корреляция между степенью общей деградации обмотки и значением поперечного усилия расслоения для одиночного проводника. Очевидно, что магнитные системы с подобными характеристиками не подходят для решения прикладных задач. Данное явление вызвано воздействием на ВТСП-ленту различных механических напряжений, возникающих при охлаждении обмотки до рабочей температуры. При этом из-за разных коэффициентов температурного сжатия проводника обмотки, эпоксидной пропитки и материала формера, ВТСП-лента подвергается частичному расслоению, что существенно снижает ее токонесущую способность. Таким образом, способность ВТСП-лент выдерживать воздействие поперечных усилий является исключительно важной.

Гарантированным методом устранения указанной проблемы является разработка более устойчивых к расслаиванию ВТСП-лент. Это позволит создавать магниты с высокой надежностью, способные работать в условиях

множественных циклов охлаждения и ввода-вывода тока. Очевидно, что разработка подобных ВТСП-проводников потребует решения широкого круга задач, как теоретических, так и экспериментальных. Одной из важных задач в этой области является создание средств и методик контроля качества производимой ВТСП-ленты. Испытания, как механические, так и электрические, готовых обмоток также весьма важны, однако, они существенно дороже, чем аналогичные испытания отдельных лент.

Коллективом авторов работы [48] была проведена серия экспериментов по расслоению ВТСП-лент второго поколения. Авторы использовали методику растяжения ленты в поперечном направлении с применением латунных наковален. Исследовались образцы ВТСП-лент на основе YBCO с медным покрытием и без него. Часть образцов дополнительно укреплялась напаянной медной фольгой. В зависимости от типа образца, для его закрепления применялась пайка или склейка.

Измерения электрических свойств образца осуществлялось при постоянно протекающем через него токе. Изначально в образец подается ток, величина которого соответствует критическому току без наличия каких-либо механических напряжений на образце. В процессе растяжения в поперечном направлении происходит измерение электрического напряжения, возникающего на образце. Электрическое напряжение остается постоянным вплоть до момента начала деградации критического тока. Далее расчетными методами устанавливается зависимость критического тока от механического напряжения.

Были получены следующие результаты. На рисунке 3 показаны результаты для ленты шириной 10 мм, не прошедшей процедуру вырезки.

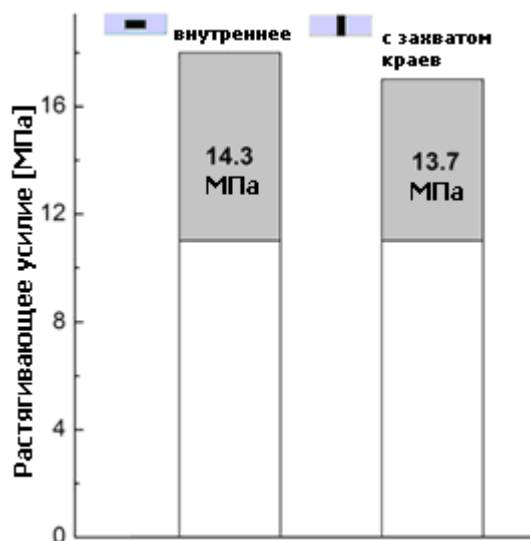


Рисунок 3. Сравнение результатов испытаний ВТСП-лент на расслоение.

Левый столбец соответствует положению наковальни по центру образца, правый – поперек образца с захватом границ. Максимальное напряжение расслоения для «продольного» варианта составляет 18,0 МПа, среднее – 14,3 МПа. Максимальное напряжение расслоения для «поперечного» варианта составляет 17,0 МПа, среднее – 13,7 МПа. Для образца, не прошедшего процедуру резки, захват границ при растяжении не оказывает существенного эффекта на напряжение расслоения.

На рисунке 4 показаны результаты испытаний вырезанных образцов ВТСП-ленты в жидком азоте.

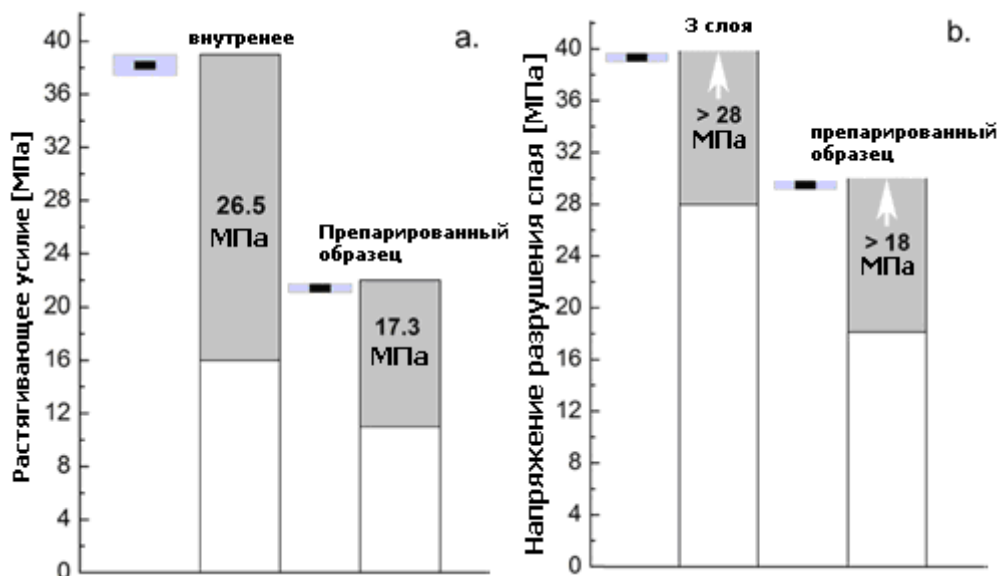


Рисунок 4. Сравнение результатов испытаний ВТСП-лент на расслоение.

На рисунке 2а представлены результаты испытаний образцов без медного стабилизатора. Левый столбец соответствует образцам, шириной 10 мм с продольным расположением наковальни. Максимальное напряжение расслоения для этой конфигурации составляет 39,0 МПа, среднее – 26,5 МПа. Правый столбец соответствует образцам, шириной 4 мм. Максимальное напряжение расслоения для этой конфигурации составляет 22,0 МПа, среднее – 17,3 МПа. На рис. 2б представлены результаты испытаний вырезанных образцов с медным стабилизатором. Для этой серии экспериментов была изготовлена отдельная партия образцов, шириной 4,4 мм. Таким образом, появлялась возможность расположить наковальню без захвата границ ленты. Этим экспериментам соответствует левый столбец (рис. 4а). Стрелкой указано максимальное напряжение разрушения спая, поскольку в этой серии экспериментов, расслоение не было достигнуто. Левый столбец на рис. 4б соответствует результатам испытаний стандартных образцов шириной 4 мм с медным стабилизатором. В этом случае расслоение образца также не было достигнуто. Сниженная прочность спая образец-наковальня в этих сериях

экспериментов объясняется тем, что его площадь была уменьшена для защиты спайки между ВТСП и медным стабилизатором от перемешивания припоев.

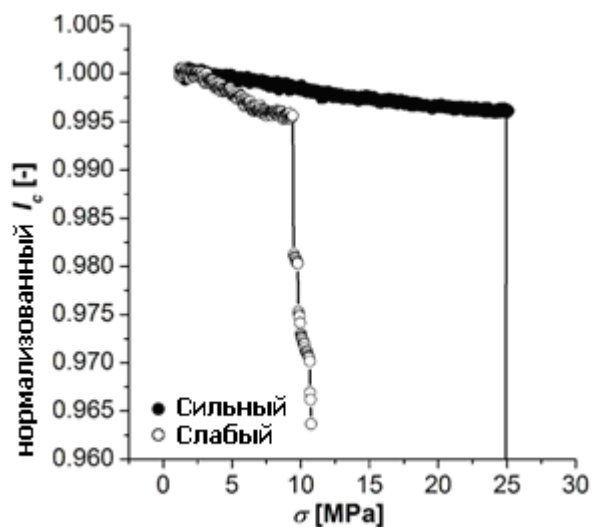


Рисунок 5. Зависимости критического тока ВТСП-лент от приложенной поперечной механической нагрузки.

На рисунке 5 показана зависимость нормализованного критического тока образцов от поперечного механического напряжения. Сплошные точки на графике (Сильный) соответствуют образцу шириной 4,4 мм со стабилизатором. Незакрашенные точки (Слабый) соответствуют образцу шириной 4 мм без стабилизатора. Очевидно, что наличие дополнительных стабилизирующих слоев положительно сказывается на токонесущей способности образца.

По этой же методике, за исключением некоторых деталей, выполнены эксперименты, описанные в работе [49]. Основным отличием является использование в качестве образцов ВТСП-лент, произведенных по различной технологии.

Другой распространенной методикой измерения механических свойств ВТСП-лент на расслоение является способ отрыва слоя. Суть этого метода сводится к тому, что механическое усилие подается на образец под острым углом к его поверхности. Результаты экспериментов, выполненных в данной

методике, а также сопутствующих исследований, изложены в работе [47]. Помимо ВТСП-лент второго поколения, авторами работы были исследованы макетные образцы, изготовленные из хастеллоя с наклеенным каптоновым покрытием. На рисунке 6 приведены результаты испытаний макетных образцов.

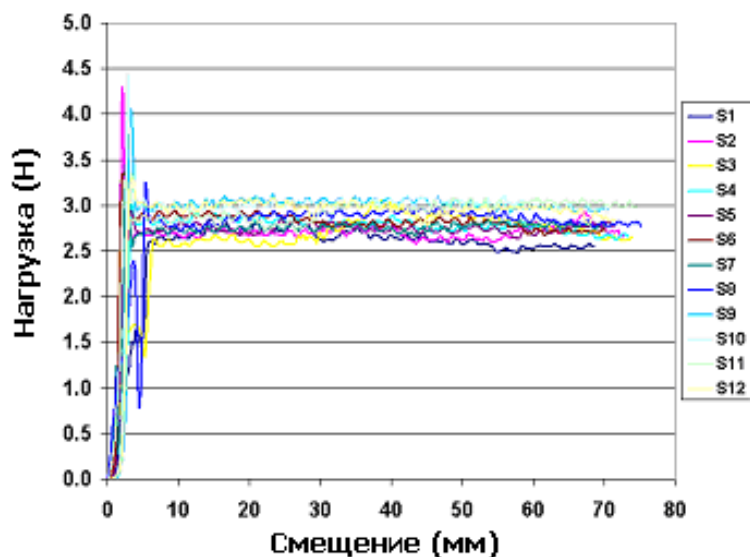


Рисунок 6. Результаты испытаний макетных образцов ВТСП-лент на отрыв слоя.

На рисунке 7 приведены результаты аналогичных испытаний образцов ВТСП-лент.

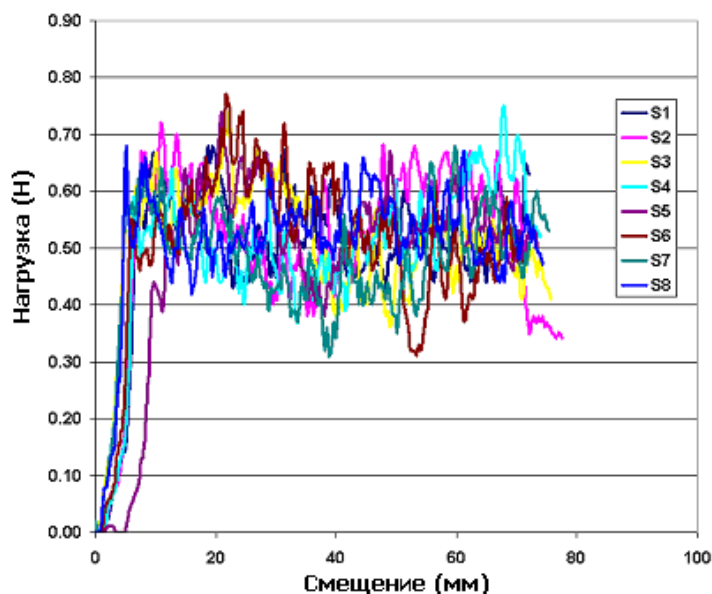


Рисунок 7. Результаты испытаний ВТСП-лент на отрыв слоя.

Как видно из графиков, усилия отрыва ВТСП-лент существенно ниже, чем аналогичные значения для макетных образцов.

Было проведено дополнительное исследование, устанавливающее корреляцию между результатами экспериментов с ВТСП-лентами и характеристиками соответствующих обмоток. Пропитанные эпоксидной смолой обмотки, подвергались термоциклированию (многократному охлаждению до температуры жидкого азота с последующим отогревом), после чего измерялся критический ток. Как было установлено, значение критического тока обмотки может существенным образом деградировать. При этом, существует соответствие между степенью деградации и значением усилия отрыва слоя для проводника обмотки. Результаты этого анализа приведены на рисунке 8.

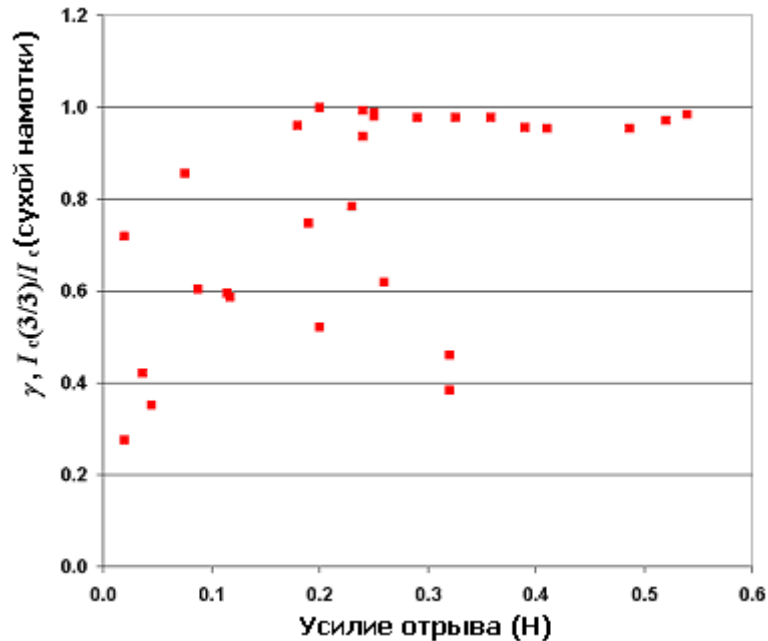


Рисунок 8. Корреляция между деградацией токонесущей способности ВТСП-лент и их механическими свойствами.

Еще одной распространенной методикой является методика расслоения образца со свободным концом. В этом случае, образец также закрепляется на двух наковальнях, однако они располагаются не по центру, а с края образца. Другой конец образца остается незакрепленным. При этом, основным результатом, является наблюдение динамики развития трещины в образце. Для обеспечения повторяемости результата, образцы, как правило, рассекаются с торца в месте закрепления наковален. Эксперименты, выполненные по данной методике, описаны в работах [50], [51] и [52]. В данных работах в качестве экспериментальных образцов использовались ВТСП-ленты GdBCO с односторонним медным покрытием. Одна из наковален припаивалась к медному слою на ленте, другая приклеивалась к слою Gd с другой стороны образца через дополнительную прокладку из хастеллоя. Следует отметить, что методы обработки результатов, примененные в данных работах, включают в себя достаточно большое количество допущений. Как следствие, итоговый результат, приведенный в указанные статьи, не обладает достаточной

наглядностью, поскольку демонстрирует изменение расчетных параметров для каждого образца во время эксперимента.

Методы проведения механических испытаний ВТСП-лент с приложением продольной нагрузки не столь разнообразны: отличия сводятся к чисто техническим моментам (способы закрепления образцов, вопросы подключения токовводов и средств измерения). Более подробно данный вопрос рассмотрен в статьях [53] – [55].

ГЛАВА 2

Разработка, изготовление и тестирование установки для криогенных механических испытаний

Необходимо провести механические испытания на разрыв труб-оболочек проводника, используемого в обмотках тороидального поля ИТЭР. Трубы изготавливаются из модифицированной нержавеющей стали 316LN. Для получения наиболее полной информации необходимо испытывать трубы-оболочки, отобранные на различных стадиях производства проводника и обмотки. Данное требование подразумевает возможность проведения механических испытаний образцов с различной геометрией и механическими свойствами. Рабочая температура при испытаниях должна изменяться в широком диапазоне: от температуры жидкого гелия до комнатной температуры. Последнее требование исключительно важно, поскольку соблюдение температурного режима при испытании, особенно когда речь идет о криогенном диапазоне температур, определяет как общее направление разработки экспериментальной установки, так и конкретные технические решения.

Задача формулируется следующим образом: разработать и создать экспериментальную установку для проведения механических испытаний на растяжение и разрыв трубчатых цилиндрических образцов. На установке должны проводиться испытания в двух температурных режимах. В первом, начальная температура испытуемого образца равна комнатной, изменения температуры образца во время испытания не подлежат обязательному контролю. Во втором режиме, температура образца непосредственно перед испытанием не должна превышать 7 К. Температуру необходимо поддерживать в процессе испытания, при этом допустим кратковременный

нагрев образца, вызванный пластической деформацией. Нагревы такого рода имеют место в рабочих условиях. Величина пикового значения температуры при этом не оговаривается в силу плохой предсказуемости, однако, время релаксации подобного всплеска не должно превышать нескольких секунд. Также необходимо учесть возможность проведения испытаний при разных рабочих температурах.

Все приведенные ниже расчеты проводились в соответствии с методами, описанными в технических руководствах [56] – [60]. Заметим, что приведенные в справочниках расчетные формулы, как правило, оперируют размерностями не стандартными для системы СИ. Описанные ниже расчеты велись в соответствии с имеющимися формулами, с последующим приведением к стандартной размерности.

2.1 Оценка параметров разрабатываемой установки

Прежде всего, необходимо оценить максимальное усилие разрыва испытуемых образцов. Поскольку точные данные по материалу образцов отсутствуют, для оценки рассчитаем усилие разрыва трубы диаметром 48 мм с толщиной стенки 2 мм, изготовленной из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Данная сталь выбрана в силу схожести ее механических свойств со свойствами 316LN (предел кратковременной прочности стали 12Х18Н10 – 510 МПа, аналогичное значение для 316LN – от 510 до 515 МПа согласно разным источникам). Площадь поперечного сечения трубы составляет:

$$S = \pi(D^2 - d^2)/4 \quad (1)$$

Где D – внешний диаметр трубы, d – внутренний диаметр трубы.

С учетом указанного выше, $D = 48$ мм, $d = 44$ мм. Таким образом, $S = 288,88$ мм². Предел кратковременной прочности стали 12Х18Н10Т при комнатной температуре равен 510 МПа или 5200 кгс/см². Сила, необходимая для разрыва такой трубы равна:

$$F = S\sigma \quad (2)$$

Где σ – предел кратковременной прочности материала. С учетом указанной информации, усилие разрыва равно 150,21 кН при комнатной температуре. С учетом того, что сталь становится прочнее с понижением температуры (предел кратковременной прочности составляет 17900 кг/см² при температуре 20 К), усилие разрыва трубы при температуре жидкого гелия составляет около 400 кН.

Согласно техническому заданию, образцы проходят испытание на разрыв в различных состояниях: в необработанном (т.е. в том виде, в котором поставляется производителем), а также после предварительной вытяжки на 2,5% от первоначальной длины и отжига в атмосфере гелия (650 °С в течение 200 часов). Отжиг и вытяжка предназначены для моделирования процессов, которые проходит труба-оболочка при создании обмотки магнитной системы. Так, предварительная вытяжка имитирует процедуру затяжки сверхпроводящего кабеля в оболочку. Отжиг проводится для образования сверхпроводящей фазы в Nb₃Sn. Все образцы должны быть в вариантах, как со сварным швом, так и без него. Собственно, основной целью испытаний является аттестация процесса сварки – механические свойства труб со швом при температуре жидкого гелия не должны существенным образом отличаться от свойств труб без шва. В связи с тем, что при предварительной вытяжке изменяется диаметр образца, а отжиг существенно меняет свойства материала, возможны отклонения полученных экспериментальных результатов от

расчетных. Кроме того, необходимо корректировать геометрию захватов образца в зависимости от его диаметра.

Испытания должны проводиться в соответствии с международными стандартами ASTM и ASME. На рисунке 9 приведена схема испытания, согласно которой устанавливается длина образца (в зависимости от наличия сварного шва и диаметра).

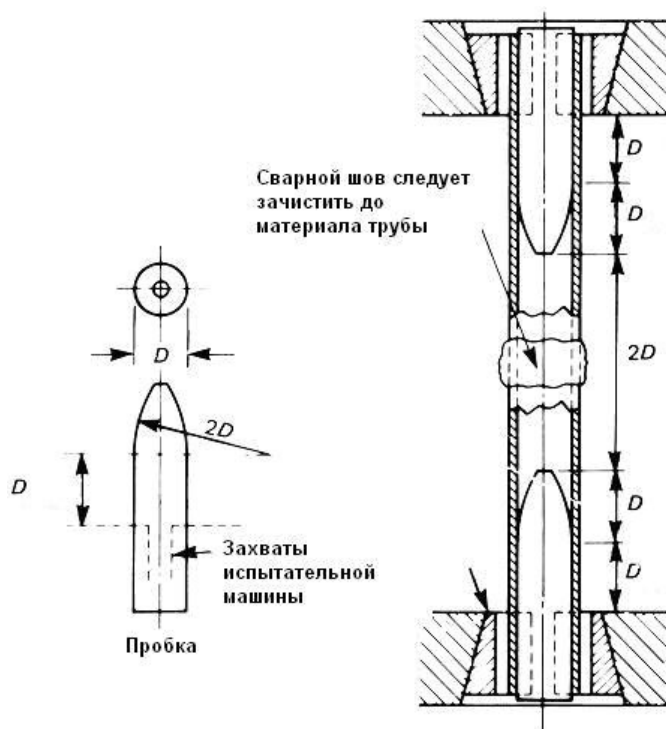


Рисунок 9. Стандартная схема подготовки образца к испытаниям.

Необходимым элементом являются пробки, вставляемые в образец. Пробки предназначены для предотвращения изменения диаметра образца во время испытания и, как следствие, возможного разрушения в захвате (или проскальзывания в случае фрикционного зажима). Соответственно, при проектировании систем захвата и удержания образца при испытании следует обеспечить возможность установки пробок.

Было принято решение о создании модульной испытательной машины с возможностью работы в двух вариантах: базовым, для испытаний при

комнатной температуре и модифицированным, с установленной системой охлаждения образца до рабочей температуры. В качестве базовой силовой установки было решено использовать испытательную машину F-250, собственную разработку НИЦ «Курчатовский институт». Ранее эта машина применялась для испытания подвесов детектора «ATLAS».

При разработке рассматривалось два варианта системы охлаждения: с теплоотводом по тепловым мостам (т.н. косвенное охлаждение) и с теплоотводом непосредственно в хладагент. Рассмотрим их подробнее.

В случае системы косвенного охлаждения предполагалось, что тепло от образца будет отводиться по медным трубкам, сквозь которые продувается холодный газообразный гелий. Аналогичная система существовала в первоначальной версии F-250, однако она была спроектирована для создания градиента температуры на поверхности плоского испытуемого образца. Предыдущий опыт использования F-250 показал достаточно высокую температурную инертность системы. Использование косвенного охлаждения для механических испытаний труб осложнено по сравнению с плоскими образцами. Достаточно сложно обеспечить необходимый тепловой контакт между образцом и охлаждающими трубками. Наиболее логичным решением этой проблемы видится припаивание трубок к испытуемому образцу, однако это само по себе является нетривиальной технической задачей и, как следствие, сильно усложняет как подготовку отдельного испытания, так и эксплуатацию машины в целом. Далее, принципиально невозможно обеспечить полный и равномерный тепловой контакт в силу очевидной разницы в геометрии образца и теплоотводных капилляров. Таким образом, даже при обеспечении должного контакта, неизбежно возникновение неравномерности температуры поверхности образца при испытании. Как следствие, механические свойства более холодных областей образца будут отличаться от свойств соседних, более теплых участков. Разумеется, подобные

условия недопустимым образом скажутся на достоверности результатов испытаний. Наконец, даже если обозначенные выше проблемы будут решены, остается вопрос о нагреве образца, вызванным его пластической деформацией. Как уже было сказано, по условиям испытаний, температура поверхности образца должна оставаться постоянной, за исключением кратковременного (не более нескольких секунд) повышения. Однако инерционность системы косвенного охлаждения не обеспечивает достаточно быстрого отвода выделяемого на образце тепла. Поскольку с повышением температуры механическая прочность испытываемого материала снижается, возникновение нагрева при нагрузках, близких к пределу прочности образца, может вызвать его преждевременный разрыв. Разумеется, эффективность системы косвенного охлаждения с точки зрения скорости отвода тепла напрямую зависит от скорости нагрева образца. Однако с учетом явления скачкообразной деформации нержавеющей сталей при криогенных температурах, следует ожидать резких скачков температуры образца.

Достоинствами системы косвенного охлаждения являются относительно небольшая стоимость изготовления и эксплуатации, невысокий расход хладагента (вплоть до возможности создания замкнутой системы с малыми потерями) и возможность точечного подвода хладагента.

Рассмотрим подробнее систему прямого охлаждения. В этом случае испытываемый образец охлаждается путем полного погружения в жидкий гелий. Достоинства этого метода очевидны: быстрый теплосъем, максимально возможный тепловой контакт, равномерность охлаждения. Основным недостатком подхода является необходимость погружения в хладагент не только образца, но и крепежных элементов. Как следствие, расход жидкого гелия существенно увеличивается, что влечет за собой рост стоимости одного испытания.

С учетом всего вышеизложенного, было принято решение о разработке системы прямого охлаждения, устанавливаемой на силовую раму установки F-250.

2.2 Описание силовых элементов испытательной машины. Расчеты крепежных элементов для проведения испытаний при комнатной температуре

Силовая рама установки F-250 представляет собой две массивные стальные крестовины и четыре гидравлических домкрата, способных создавать усилие до 100 тс каждый. Домкраты жестко закреплены на нижней крестовине посредством стальных рубашек. Верхняя крестовина, в свою очередь, опирается на рубашки домкратов, либо закрепляется на четырех направляющих, вставленных в рубашки и касающихся головок домкратов.

Закрепление элементов испытательной машины на крестовинах производится посредством шпилек, изготовленных из стали марки 3, диаметром 30 мм с резьбой М30 на концах. На одной крестовине может быть закреплено до 18 шпилек. Оценим усилие, которое может выдержать одна шпилька. Очевидно, что это усилие в первую очередь определяется прочностными свойствами резьбы.

Для стержня круглого сечения с резьбой следует учитывать два фактора: крутящий момент, возникающий в стержне при торцевой нагрузке и смятие витков резьбы. Условие прочности относительно крутящего момента:

$$0.25d_1^2\pi\sigma = 1.3P \quad (3)$$

Где d_1 – внутренний диаметр резьбы, мм;

σ – допускаемое напряжение материала, кгс/мм²

P – торцевая нагрузка, кгс.

В качестве допускаемого напряжения возьмем предел текучести стали 3, составляющий 21 кг/мм². Внутренний диаметр резьбы М30 составляет 25,454 мм. Таким образом, допустимая торцевая нагрузка составляет 16930,9 кгс.

Условие прочности относительно смятия витков резьбы:

$$\frac{P}{\frac{\pi}{4}(d_0^2 - d_1^2)z} \leq \sigma_1 \quad (4)$$

где d_0 – наружный диаметр резьбы, мм

z – число работающих витков

σ_1 – допускаемое напряжение материала стержня при смятии, кг/мм²

Здесь и далее, значение σ_1 принимается за 0,5 от допускаемого напряжения материала на растяжение. Число работающих витков в данном случае определяется параметрами гайки. Шаг резьбы составляет 3,5 мм, высота гайки – 25 мм. Таким образом, число работающих витков резьбы не превышает 7.

Допускаемое напряжение материала при смятии составляет 19 кг/мм². Допустимая нагрузка в этом случае равна 263 кН.

Таким образом, допускаемая нагрузка на одну шпильку составляет 16,9 тс. С учетом геометрии крестовин испытательной машины и общего удобства эксплуатации, для испытаний предпочтительнее использовать шесть шпилек, расположенных по внутреннему радиусу креплений. Шесть шпилек выдерживают суммарную нагрузку в 1,014 МН, следовательно, их использование допустимо как для испытаний при комнатной температуре (ориентировочная нагрузка – 200 кН), так и при температуре жидкого гелия (ориентировочная нагрузка – 450 кН).

Испытания при комнатной температуре требуют закрепления испытуемого образца трубы на силовой раме испытательной машины и

установки на образец датчиков деформации. Усилие, передаваемое на образец, измеряется штатным датчиком испытательной машины.

Основной проблемой испытаний при комнатной температуре является безмоментное закрепление образца. Согласно стандартам ASME и ASTM, механическая обработка образца допустима, однако, рабочая длина (определяемая его диаметром) не должна подвергаться каким-либо воздействиям. Было принято решение использовать электродуговую сварку в атмосфере инертного газа (аргон) для закрепления образца. Данный способ подходит для испытаний в любом температурном диапазоне, что выгодно отличает его от закрепления в зажиме – последний плохо применим для криогенных температур.

Необходимость безмоментности закрепления образца вызвана неидеальностью центрирования крестовин испытательной машины, а также, высокой вероятностью асинхронной работы домкратов. Было решено использовать шарнирное закрепление образца.

Полностью схема установки F-250 в варианте для проведения испытаний при комнатной температуре дана на рисунке 10.

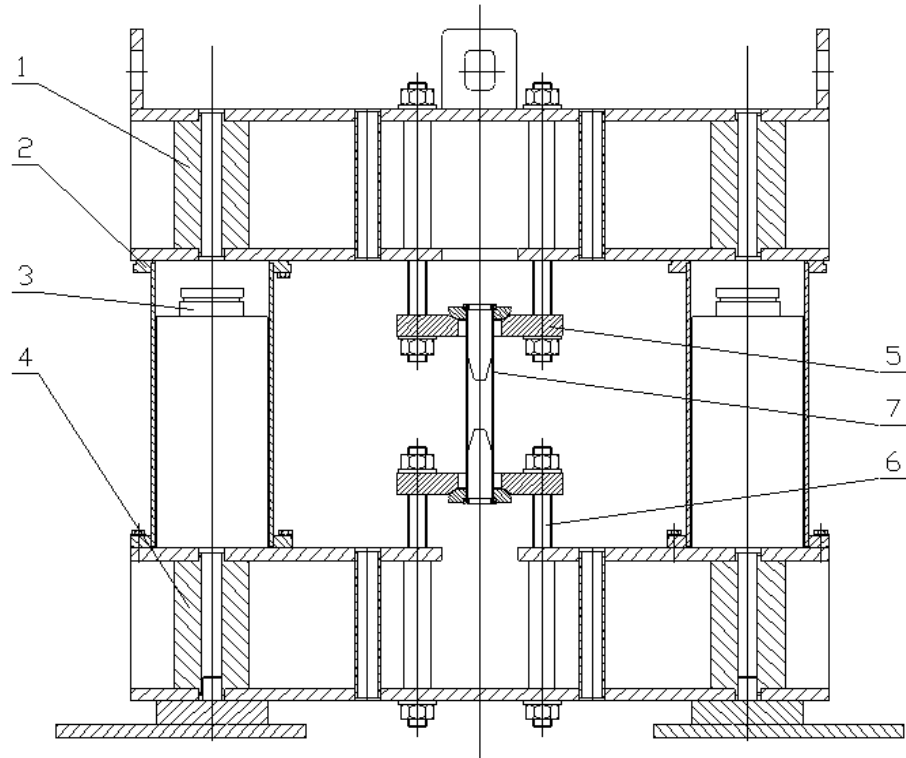


Рисунок 10. Общая схема модификации установки для проведения испытаний при комнатной температуре.

На схеме изображены:

- 1 – Верхняя крестовина
- 2 – Рубашка домкрата
- 3 – Домкрат
- 4 – Нижняя крестовина
- 5 – Крепежный диск
- 6 – Шпилька
- 7 - Образец

Ниже, на рисунке 11 дано схематическое изображение шарнирного закрепления образца. Как видно на иллюстрации, к концам трубы приварены упорные кольца (1), предназначенные для зацепления образца (2) за шарнир (3). Шарнир, в свою очередь, устанавливается на крепежный диск (4). Диск снабжен прорезью для быстрой смены образца.

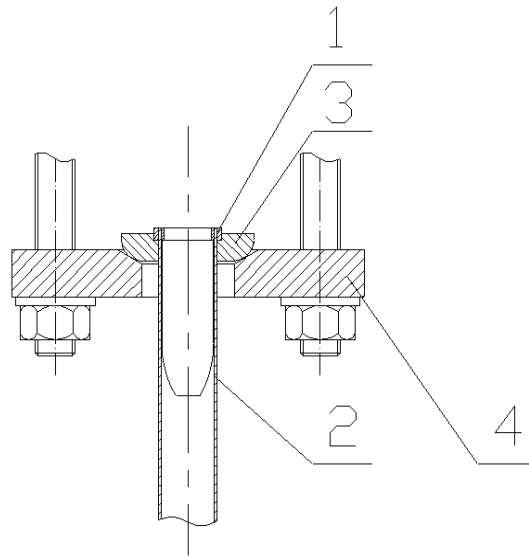


Рисунок 11. Схема безмоментного закрепления образца

В силу того, что диск обладает достаточно сложной геометрией, был произведен оценочный прочностной расчет методом конечных элементов. По результатам расчета (см. рисунок 12), диск выдерживает усилие в 200 кН с коэффициентом запаса прочности 1,2.

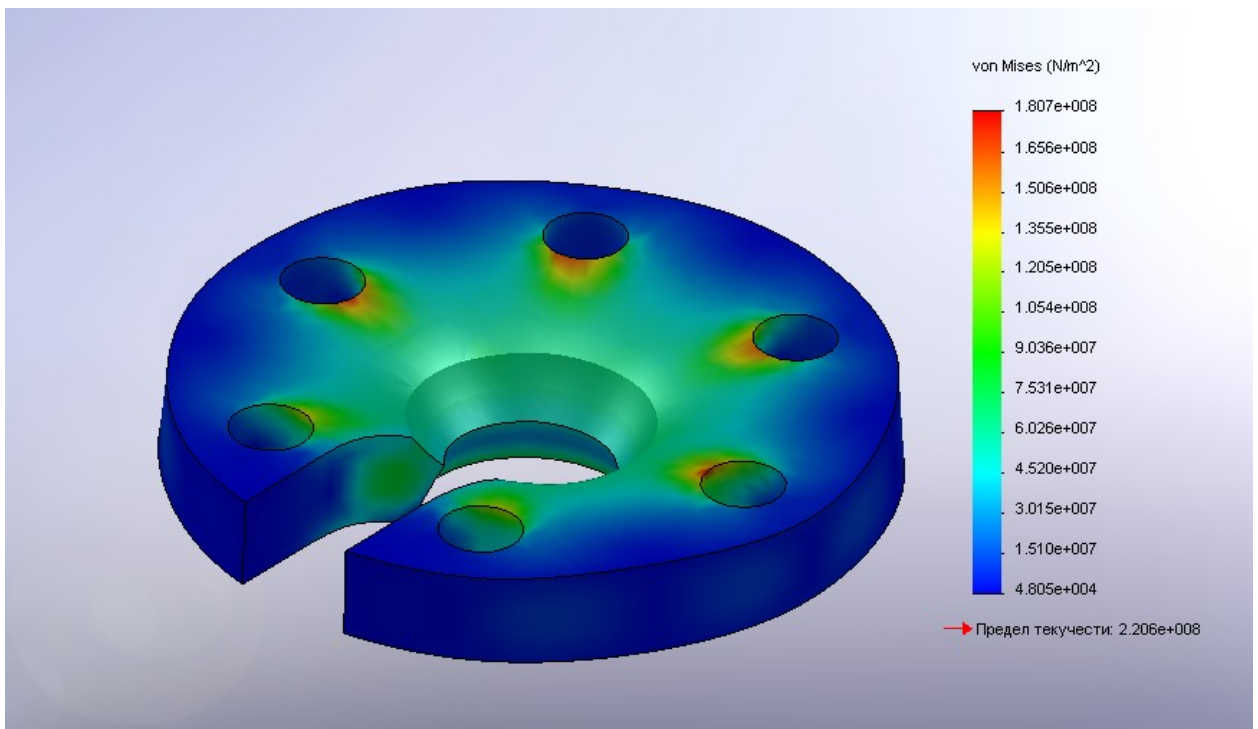


Рисунок 12. Результат численного расчета прочности крепежного диска

Измерения усилия, передаваемого на образец, как уже было сказано, осуществлялись по давлению масла в гидравлической системе штатным датчиком «Сапфир 22МТ». Для измерения деформации использовались потенциометрические датчики перемещения «Gefran PZ-12-A-150». Последние закреплялись попарно, с двух сторон образца. Установка датчиков производилась через пружинные захваты – таким образом обеспечивалось надежное закрепление, учитывающее уменьшение диаметра образца в процессе испытания.

2.3 Методика проведения испытаний при комнатной температуре

1. Подготовка образца. Устанавливаются пробки и шарнирные шайбы. После установки, к образцу привариваются (ручная электродуговая сварка в аргоне) упорные кольца. На шарнирные шайбы наносится графитовая смазка.
2. Образец устанавливается в пазы крепежных дисков. При установке образца с каждого диска предварительно снимают по две шпильки (ближайшие к пазам).
3. После закрепления образца на него устанавливаются датчики деформации «Gefran PZ-12-A-150» под углом 180° друг к другу. Производится юстировка дисков относительно горизонтали. Датчики подключают к измерительной системе.
4. На образец подается механическая нагрузка со скоростью нарастания около 1 тс/мин. Нагружение проводится либо до разрыва образца, либо до его вытяжки на 2,5 % от первоначально длины – в зависимости от требований технического задания.
5. По завершении испытания производится демонтаж образца.

2.4 Разработка криостата для проведения испытаний при криогенных температурах

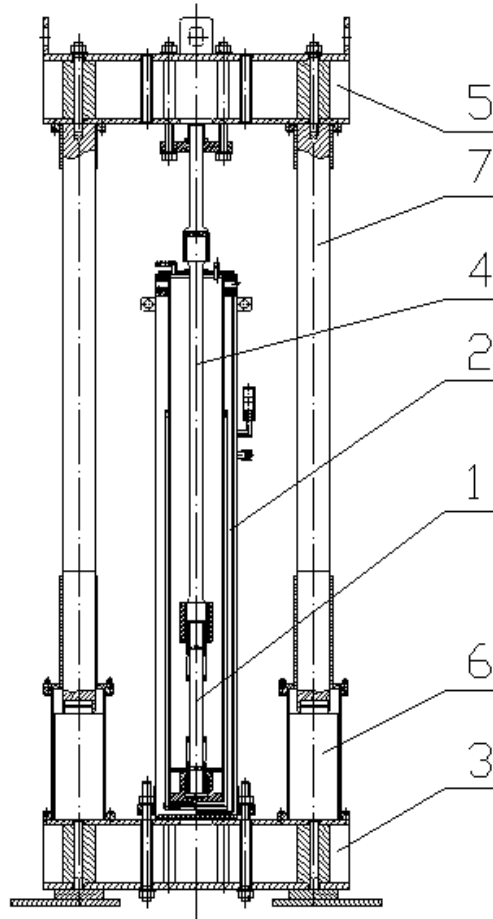


Рисунок 13. Общая схема установки для проведения испытаний при криогенной температуре.

Схема криостата приведена на рисунке 13. Закрепление образца (1) происходит на резьбовом терминале в дне внутренней емкости криостата (2). Таким образом, жестко закрепленный на нижней крестовине (3) криостат играет роль силовой конструкции, передающей нагрузку на образец. С другой стороны, образец, через шток (4) и присоединительные детали, закрепляется

на верхней крестовине (5). Перемещение верхней крестовины обеспечивается домкратами (6) и опорными колоннами (7).

Очевидно, что криостат должен выдерживать воздействие механической нагрузки, значительно превышающей расчетную нагрузку, необходимую для разрыва образца. При расчетах необходимо учитывать, что в процессе испытаний элементы криостата находятся при разных температурах.

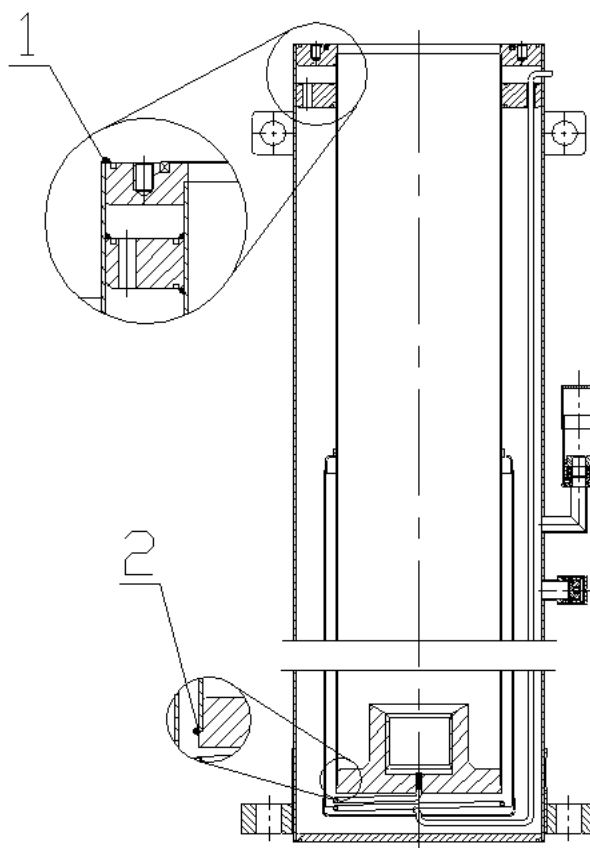


Рисунок 14. Общая схема криостата с указанием нагруженных вакуумноплотных сварных швов.

Исходя из геометрии криостата, можно сделать вывод о распределении усилий в элементах конструкции. Стенка внутренней емкости находится под воздействием сжимающего усилия, стенка внешней емкости – растягивающего. Фланец, находящийся внутри вакуумного объема криостата выполняет функцию контрфорсного элемента. Необходимо пояснить, что при отсутствии означенного фланца вся нагрузка легла бы на сварные швы между

верхним фланцем и стенками. В предположении, что данные швы должны быть одновременно вакуумными и силовыми. Это крайне нежелательно с точки зрения сохранения вакуумной плотности. В случае длительного использования, на силовых швах (обозначены цифрами 1 и 2 на рисунке 14), находящихся под воздействием растягивающей нагрузки, неизбежно возникновение трещин, что сразу же приведет к нарушению вакуума и потере криостатом работоспособности. При наличии же дополнительного фланца, вакуумные швы механически разгружаются (за исключением нагрузок, связанных с перепадом давления между внешней средой и вакуумным объемом и веса крышки, лежащей на фланце). Заметим, что швы 1 и 2 так же являются вакуумными, однако, шов 1 разгружен методом, который будет рассмотрен ниже, а шов 2 испытывает нагрузку на сжатие. В последнем случае также играет роль геометрия донца – наличие упора снижает вероятность деформации шва. Таким образом, необходим механический расчет двух обечаек и внутреннего донца с резьбовым терминалом как элементов, подвергающихся воздействию повышенной нагрузки. Прочие элементы конструкции необходимо рассчитывать только для нагрузок, связанных с разностью внешнего и внутреннего давлений.

2.5 Расчет внутренней обечайки криостата

В качестве обечаек криостата были взяты нержавеющей трубы, снятые со старой магистрали сбора газообразного гелия. Был произведен прочностной расчет, подтверждающий пригодность этих труб для изготовления обечаек.

Наружный диаметр внутренней обечайки равен 200 мм, толщина стенки – 2,5 мм. Высота обечайки определялась исходя из общих габаритных

размеров криостата, и равна 1789 мм. Материал обечайки – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, допустимое напряжение при комнатной температуре – 1840 кг/см², модуль Юнга – 1,99*10⁶ кг/см². В криостате обечайка подвержена действию одновременно избыточного внутреннего давления в 1 атм и сжимающего осевого усилия до 450 кН. Соответственно, необходимо рассчитать допустимые нагрузки для обечайки указанных размеров и сравнить их с рабочими.

Допустимое внутреннее давление для гладких цилиндрических обечаек рассчитывается по формуле:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p s}{D + s} \quad (5)$$

Где $[p]$ – давление, атм;

$[\sigma]$ – допустимое напряжение материала на растяжение, кг/см²;

φ_p – коэффициент прочности сварного шва;

s – толщина стенки, см;

D – внутренний диаметр обечайки, см.

Труба была изготовлена с применением машинной стыковой сварки с одной стороны с полным контролем шва по всей длине. Коэффициент прочности φ_p в этом случае равен 0,9. Исходя из указанных выше данных, допустимое давление составляет 4,192 МПа.

Допустимое усилие на сжатие для гладких цилиндрических обечаек определяется по формуле:

$$[F] = \frac{[F]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{II}}{[F]_E}\right)^2}} \quad (6)$$

Где $[F]$ – допускаемое усилие на сжатие, кгс;

$[F]_{II}$ – допускаемое усилие из условия прочности, кгс;

$[F]_E$ – допускаемое усилие в пределах упругости из условия устойчивости, кгс.

При расчетах следует использовать значение допустимого напряжения материала на растяжение при криогенных температурах. Для нержавеющей стали 12Х18Н10Т оно составляет 6000 кг/см^2 .

Допускаемое усилие из условия прочности определяется по формуле:

$$[F]_П = \pi(D + s)s[\sigma] \quad (7)$$

Для рассчитываемой обечайки $[F]_П = 930 \text{ кН}$.

Допустимое усилие из условия устойчивости в общем виде определяется как минимум:

$$[F]_E = \min\{[F]_{E1}; [F]_{E2}\} \quad (8)$$

Где $[F]_{E1}$ – допускаемое сжимающее усилие, определяемое из условия местной устойчивости, кгс;

$[F]_{E2}$ – допускаемое сжимающее усилие, определяемое из условия общей устойчивости, кгс. Существует условие, согласно которому, если отношение

$\frac{l}{D} < 10$, то принимается

$$[F]_E = [F]_{E1}$$

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^2 \left(\frac{100s}{D} \right)^{2,5} \quad (9)$$

Где E – модуль Юнга, кг/см^2 ;

n_y – коэффициент запаса прочности, согласно методике, при расчетах рабочего режима (т.е. долговременной нагрузки) сосудов и аппаратов коэффициент следует принимать равным 2,4.

Для рассчитываемой обечайки $[F]_E = [F]_{E1} = 1,82 \text{ МН}$.

Итоговое значение допускаемого усилия на сжатие, рассчитанное по формуле (6) составляет 828 кН.

2.6 Расчет внешней обечайки криостата

Наружный диаметр внешней обечайки равен 300 мм, толщина стенки – 3 мм. Высота обечайки равна 1870 мм. Материал обечайки – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, допустимое напряжение при комнатной температуре – 1840 кг/см², модуль Юнга – 1,99*10⁶ кг/см². В процессе работы криостата обечайка подвергается воздействию внешнего избыточного давления в 1 атм. и растягивающего усилия до 45 тс.

Допускаемое наружное давление для гладких цилиндрических обечаек рассчитывается по формуле:

$$[p] = \frac{[p]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{II}}{[p]_E}\right)^2}} \quad (10)$$

где $[p]_{II}$ – допускаемое давление, определяемое из условия прочности по формуле:

$$[p]_{II} = \frac{2[\sigma]s}{D + s} \quad (11)$$

для указанных выше параметров трубы $[p]_{II} = 37,172$ кг/см²

$[p]_E$ – допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, определяемое по формуле:

$$[p]_E = \frac{20,8 * 10^{-6} E D}{n_y B_1 l} \left(\frac{100s}{D}\right)^{2,5} \quad (12)$$

где B_1 определяется:

$$B_1 = \min \left\{ 1, 0,9, 45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100s}} \right\} \quad (13)$$

n_y – коэффициент запаса прочности. Согласно методике, для режима работы под постоянной нагрузкой $n_y = 2,4$.

Величина $9,45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100s}}$ для указанных параметров обечайки составляет 1,47, следовательно, значение коэффициента B_l принимается за единицу. Соответственно, допускаемое давление $[p]_E = 2,849 \text{ кг/см}^2$.

Итоговое допускаемое давление $[p]=2,84 \text{ атм.}$, что удовлетворяет условиям работы обечайки.

Допускаемое осевое растягивающее усилие для гладкой цилиндрической обечайки определяется по формуле:

$$[F] = \pi(D + s)s[\sigma]\varphi_T \quad (14)$$

где φ_T – коэффициент прочности сварного шва. Для используемых труб коэффициент равен 0,9 (см. выше).

Соответственно, допускаемое осевое растягивающее усилие для обечайки составляет 463 кН. Таким образом, имеющаяся труба подходит для использования в качестве внешней обечайки криостата.

2.7 Расчет резьбового терминала

Для начала необходимо установить, какая резьба подходит для предполагаемого рабочего усилия. Выше был приведен соответствующий расчет резьбы, находящейся под действием нагрузки на растяжение. Исходя из условия прочности относительно крутящего момента, внутренний диаметр резьбы равен:

$$d_1 = \sqrt{\frac{1,3P}{0,25\pi\sigma}} \quad (15)$$

При расчетной нагрузке в 45 тс, внутренний диаметр $d_1 = 63,6 \text{ мм}$.

По условию прочности витков резьбы на смятие:

$$d_0^2 = \frac{P}{\sigma_1 z \frac{\pi}{4}} + d_1^2 \quad (16)$$

В качестве значения d_1 возьмем полученное выше, ориентировочное число витков $z = 16$. Для нагрузки P в 45 тс, значение d_0 составляет 66,5 мм.

Поскольку расчёт определяет минимально возможный диаметр резьбы, в конструкции будет применяться метрическая резьба М80 с шагом 4 мм. Данная резьба будет использоваться во всех силовых соединениях, для упрощения изготовления конструкции и обеспечения единообразия.

Необходимо учитывать, что приведенный выше расчет устанавливает лишь принципиальную возможность использования резьбы при заданной нагрузке. Практическое применение определяется сечением полной детали. В данном случае нас интересует внешний диаметр терминала, определяемый по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4S + \pi d^2}{\pi}} \quad (17)$$

где S – допустимая площадь сечения, вычисляемая по формуле для допустимой нагрузки:

$$S = \frac{P}{\sigma} \quad (18)$$

Для значения приложенного усилия P в 45 тс сечение S составляет 26,79 см². Соответствующее выбранной резьбе значение диаметра $d = 77,4$ мм. Следовательно, минимально допустимый внешний диаметр терминала $D = 96,97$ мм. Реальное значение диаметра равно 120 мм, оно определяется имеющимися материалами и производственными возможностями.

Резьбовой терминал представляет собой одну деталь с внутренним днищем криостата. Необходимо произвести расчет днища на прогиб. В общем виде, для круглой пластины, свободно лежащей на опоре с нагружением в центре, распределенным по кругу меньшего радиуса

$$\sigma = \frac{3(1+\mu)P}{2\pi t^2} \left[\frac{1}{1+\mu} + \ln \frac{r}{r_0} - \frac{(1-\mu)r_0^2}{(1+\mu)4r^2} \right] \quad (19)$$

Где r – внешний радиус пластины, r_0 – радиус области, по которой распределена нагрузка P , μ – коэффициент Пуассона, t – толщина пластины, σ – допустимое напряжение. В нашем случае значения r и r_0 заданы размерами внутренней обечайки криостата и резьбового терминала. Соответственно, $r = 9,75$ см, $r_0 = 6$ см. Коэффициент Пуассона для стали 12Х18Н10Т равен 0,3. Расчетное значение нагрузки 45 тс. Для вычисления значения t формула преобразуется в следующий вид:

$$t = \sqrt{\frac{3(1+\mu)P}{2\pi\sigma} \left[\frac{1}{1+\mu} + \ln \frac{r}{r_0} - \frac{(1-\mu)r_0^2}{(1+\mu)4r^2} \right]} \quad (20)$$

Подстановка указанных выше значений переменных дает результат:
 $t = 3$ см

2.8 Выбор системы захвата образца. Прочностные расчеты захватов

Выбор способа закрепления образца при испытаниях является определяющим для всей конструкции установки. В свою очередь, специфичные условия проведения испытаний (криогенные температуры, большие рабочие усилия), накладывают жесткие требования на конструкцию крепежных элементов. При разработке описываемой установки выбор осуществлялся между фрикционными, пальцевыми и сварными крепежными элементами.

Использование зажима, работающего за счет силы трения, представляется неприемлемым в условиях криогенных температур. Коэффициент трения между материалами зажима и образца при температуре

жидкого гелия может оказаться недостаточен. Также надежному фрикционному закреплению препятствует разница в коэффициентах температурного расширения. Наконец, при использовании фрикционных зажимов, существует вероятность повреждения образца в процессе закрепления. Таким образом, от закрепления образца за счет силы трения было решено отказаться.

Проверим возможность использования пальцевого закрепления. Для этого необходимо рассчитать диаметр пальца исходя из заданной нагрузки на срез. В общем виде допустимая нагрузка на срез рассчитывается по формуле:

$$\tau_{cp} = \frac{Q}{iA_{cp}} \quad (21)$$

где τ_{cp} – расчетное напряжение среза в поперечном сечении, Q – поперечная сила, возникающая в этом сечении, A_{cp} – площадь поперечного сечения, i – количество работающих деталей. Площадь сечения определяется по формуле

$$A_{cp} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (22)$$

где d – диаметр пальца. Для вычисления размеров пальца формула преобразуется следующим образом:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{i\pi\tau_{cp}}} \quad (23)$$

Поскольку в рассматриваемом случае контакт образца происходит в двух точках, $i = 2$. Расчетная нагрузка $Q = 45$ тс, τ_{cp} принимаем равным 0,8 от допустимого напряжения при растяжении, т.е $\tau_{cp} = 1472$ кг/см². Подставив эти значения переменных, получим результат $d = 4,4$ см, что практически совпадает с диаметром образца. Очевидно, что использование пальцевого закрепления при данных условиях конструкторской задачи невозможно.

Проверим возможность использования сварного соединения. Предположим, что в крепежном элементе используется кольцевой сварной

шов по периметру образца. Для угловой сварки существует следующее условие прочности:

$$P = 0,7[\tau']_{cp} kL \quad (24)$$

Где P – максимально допустимое приложенное усилие, $[\tau']_{cp}$ – допустимая нагрузка на срез для сварного шва, k – катет сварного шва, L – суммарный периметр шва. Для ручной сварки в защитном инертном газе (аргон) $[\tau']_{cp}=0,6[\sigma]_p$, где $[\sigma]_p$ – допускаемое напряжение на растяжение для материала, который подвергается сварке. В случае нержавеющей стали при температуре жидкого гелия значение $[\tau']_{cp}$ составляет 3600 кг/см². Катет сварного шва не может превышать значения толщины самой тонкой из свариваемых деталей. Принимаем $k = 4$ мм. Соответственно, для нагрузки в 450 кН потребуется сварной шов длиной 450 мм, чего вполне можно добиться.

Необходимо учесть, что захват на сварке не будет работать для образцов, чей материал существенным образом отличается от нержавеющей стали. Как уже было сказано, в данной работе испытывались образцы отожженной стали 316LN – даже для них прочность сварки с захватом может отличаться от расчетных значений.

2.9 Расчет крепежного штока

Шток, соединяющий образец с рамой испытательной машины, представляет собой стержень круглого сечения из нержавеющей стали 12X18Н10Т. Верхний конец штока снабжен резьбой М80 с шагом 4 мм. Расчет данной резьбы на прочность приведен выше. На нижнем конце штока находится гайка с такой же резьбой, предназначенной для закрепления образца. Длина штока равна 1458 мм. Это значение определено исходя из

габаритных размеров силовой рамы испытательной установки, высоты криостата и длины образца. Сечение определяется простым расчетом исходя из условия прочности:

$$S = \frac{F}{\sigma} \quad (25)$$

Где F – растягивающее усилие, кгс; σ – допустимое напряжение на растяжение. Диаметр штока d определяется по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (26)$$

Для расчетного усилия на растяжение в 45 тс и указанного материала площадь сечения составляет 24,45 см², что соответствует диаметру в 5,5 см.

2.10 Расчет элементов для закрепления криостата на силовой раме испытательной машины

Криостат устанавливается на нижнюю крестовину испытательной машины и закрепляется на ней двенадцатью шпильками М30 из комплекта крепежа. Установочный фланец выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, толщина фланца равна 35 мм, диаметр – 426 мм. Габариты фланца определены исходя из присоединительного размера крестовины силовой рамы. Для разделения силовых и вакуумных сварных швов в пространстве, а также для общего усиления конструкции, крепежный фланец приварен по описанной выше технологии сварного шва с развитым периметром. Фланец приваривается к сварной обечайке, которая потом приваривается к внешней стенке криостата. При этом, вся крепежная конструкция сдвинута вверх относительно дна криостата – таким образом, вакуумный шов отделяется от силового, оставаясь при этом доступным для возможного ремонта. При сборке установки между крестовиной и криостатом устанавливаются стальные шайбы

– в результате вакуумный шов на днище криостата не контактирует с поверхностью крестовины.

Шток криостата закрепляется на раме машины через устройство безмоментного соединения, в виде резьбового захвата с шарниром и крепежного диска, аналогичных тем, что используются для проведения испытаний при комнатной температуре. Все элементы изготовлены из стали марки 3. Диаметр захвата равен 80 мм – допустимая нагрузка для этого диаметра равна 91 тс. Резьба в захвате соответствует резьбе на штоке – М80х4. Внешний диаметр резьбовой части равен 100 мм – допустимая нагрузка составляет 51,7 тс. Упор на захвате приварен по технологии сварки с развитым периметром. Общая длина сварки (кольцевой шов, плюс четыре квадратных прорези со стороной 30 мм) позволяет выдержать нагрузку более 1 МН. Расчет из условия прочности резьбы для материала захвата показывает, что резьба выдерживает нагрузку в 630 кН. Расчет прочности крепежного диска был произведен численными методами, результат приведен на рисунке 15.

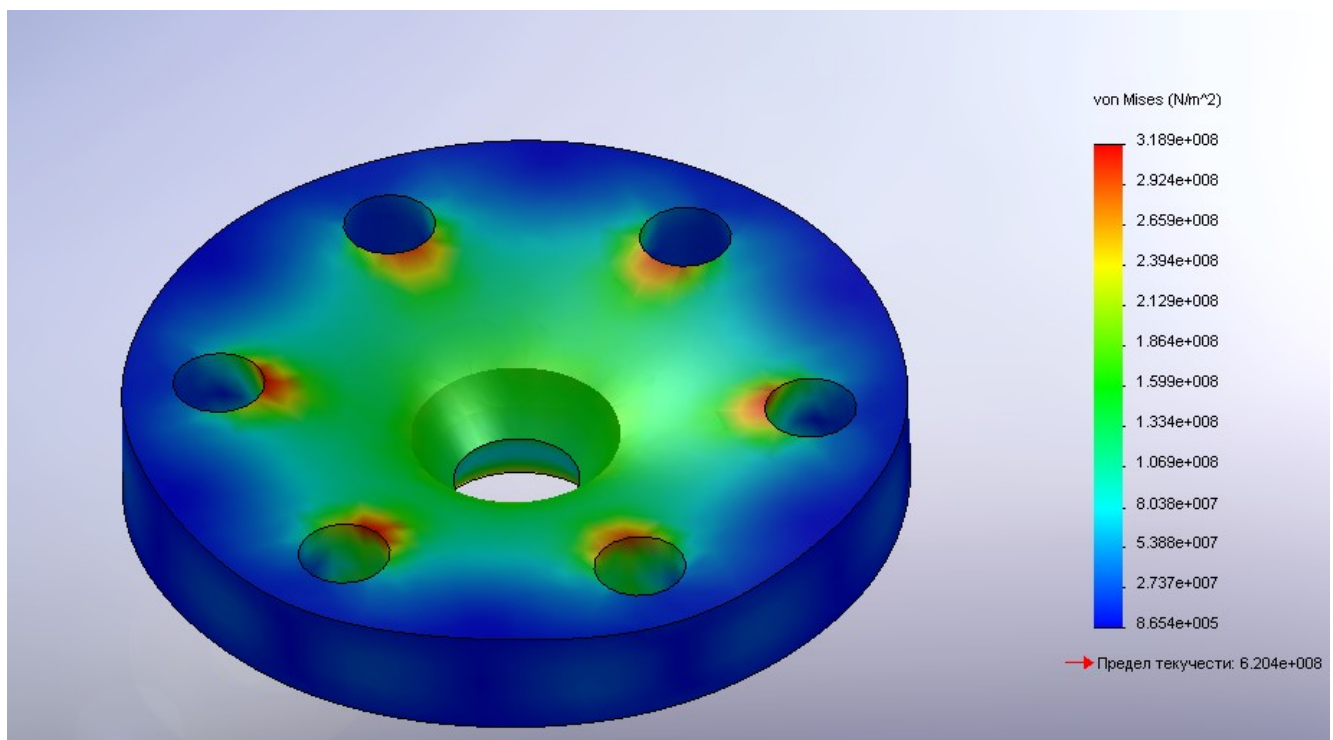


Рисунок 15. Результат численного прочностного расчета крепежного диска.

2.11 Оценка расхода хладагента

Необходимо сразу отметить тот факт, что при проектировании элементов системы охлаждения образца приоритетной задачей было обеспечение необходимой прочности конструкции. Поэтому приведенные ниже расчеты носят исключительно оценочный характер и служат для примерного определения расхода жидкого гелия.

Во время испытаний необходимо, чтобы образец был полностью погружен в хладагент. Минимальный уровень, при котором это условия выполняется, составляет 400 мм – граница жидкость-газ проходит по нижней кромке верхнего захвата. Таким образом, необходимо охладить три массивные детали: донце, нижний захват и сам образец (плюс пробки). Масса днища равна 10,5 кг, масса образца – 0,9 кг, масса захвата – 4 кг. Суммарная масса двух пробок из алюминиевого сплава Д-16 равна 0,7 кг. Количество теплоты, отводимое от объекта, определяется по формуле:

$$Q = mc(T_2 - T_1) \quad (27)$$

где: Q – количество тепла, m – масса объекта, c – удельная теплоемкость. Строго говоря, теплоемкость является функцией температуры, однако для грубой оценки ее можно считать постоянной и равной значению, соответствующему максимальному значению температуры. Поскольку перед заливкой жидкого гелия криостат охлаждается жидким азотом, температуры T_1 и T_2 соответствуют значениям 4,2 К и 77 К. Для всех деталей из нержавеющей стали, $Q = 224224$ Дж. Дюралевые пробки потребуют отвода 17683 Дж. Оценим количество жидкого гелия, затраченного на охлаждение. Для определения максимально возможного значения не будем учитывать отвод тепла в газообразный гелий, полученный при испарении. Воспользуемся формулой

$$Q = mL \quad (28)$$

где: m – масса испаряемого гелия, L – удельная теплота парообразования, Q – поглощаемая при этом энергия. $L = 20,925$ кДж/кг. Соответственно, для отвода 241907 Дж потребуется испарить 11,5 кг гелия. При плотности жидкого гелия 0,122 кг/л, это соответствует объему в 94 л.

Оценим теплопритоки в гелий в процессе испытания. Существует три основных источника теплопритока в криостат: внутренняя стенка криостата, шток и излучение от внешней стенки. Охлаждение газообразным гелием не учитываем. Теплоприток по твердому телу определяется по формуле:

$$Q = \frac{S}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT \quad (29)$$

где: S – площадь поперечного сечения стержня или трубы, L – длина стержня или трубы, $k(T)$ – теплопроводность как функция температуры, T_1 и T_2 – значения температуры на концах теплового моста (4,2 К и 300 К соответственно).

Для нержавеющей стали кривая теплопроводности в диапазоне от 4 до 300 К аппроксимируется формулой:

$$k(T) = 6,62445 * 10^{-7} T^3 - 4,94455 * 10^{-4} T^2 + 0,13742T - 0,23795 \quad (30)$$

Соответственно, при подстановке этого выражения в определенный интеграл, получим:

$$Q = \frac{S}{L} (1,6561125 * 10^{-7} T^4 - 1,648183 * 10^{-4} T^3 + 0,06871T^2 - 0,23795T) \Big|_{T_1}^{T_2} \quad (31)$$

Для внутренней стенки криостата сечение $S = 0,00155$ м², длина теплового моста $L = 1,444$ м (при уровне жидкого гелия 400 мм), получаем значение теплопритока $Q = 3,2$ Вт.

Для штока сечение $S = 0,0019625$ м², длина теплового моста $L = 1,182$ м. Соответственно, теплоприток по штоку $Q = 4,98$ Вт.

Оценим теплоприток от излучения. Гелиевый объем криостата закрыт медным экраном, охлаждаемым жидким азотом. Для этого воспользуемся формулой

$$Q = \sigma \varepsilon (T_2^4 - T_1^4) F \quad (32)$$

где: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К) – постоянная Стефана-Больцмана, ε – степень черноты поверхности гелиевого объема, F – площадь поверхности гелиевого объема. Степень черноты для стенки криостата равна 0,075, площадь поверхности, ограниченной тепловым экраном (стенка и донце), равна 0,91 м². T_2 и T_1 равны, соответственно, 77 К и 4,2 К. Подстановка этих значений в формулу даст результат $Q = 0,14$ Вт.

Таким образом, суммарный теплоприток в объем с жидким гелием составляет 8,32 Вт, что соответствует расходу гелия 11 л/ч. Приблизительное время испытания – 40 мин, т. е. будет израсходовано дополнительно 7,3 л жидкого гелия. С учетом предварительного охлаждения, получаем расход в 100 л жидкого гелия на испытание. Заметим, что это значение завышено, и, на практике, расход гелия будет меньше. Как показали эксперименты, расход гелия на одно испытание составляет приблизительно 70 – 75 л.

2.12 Методика проведения испытаний при температуре жидкого гелия

1. Образец с установленными внутри пробками приваривается к захватам (ручная электродуговая сварка в атмосфере азота). На образец через пружинные захваты с двух сторон устанавливаются датчики перемещения «Gefran PZ-12-A-50», в центральной и верхней частях образца закрепляются угольные термометры сопротивления. Термометры

приклеиваются на термопасту КПТ-8 и дополнительно прикрепляются каптоновой клейкой лентой.

2. Верхний захват вкручивается в гайку на штоке. Шток вместе с образцом опускается в криостат. Верхняя крестовина силовой рамы пока не установлена на колонны домкратов.
3. Нижний захват вкручивается в терминал на дне криостата. Вкручивание производится через шток и образец. В процессе установки не следует допускать перекручивания проводов от датчиков перемещения и термометров.
4. Криостат закрывается крышкой, производится уплотнение штока. Датчики перемещения и температуры подключаются к автоматизированной измерительной системе.
5. В гелиевый объем криостата заливается приблизительно 50 литров жидкого азота. После охлаждения внутреннего объема криостата, через заливочный патрубок на крышке подается газообразный гелий (избыточное давление регулируется редуктором на баллоне в зависимости от скорости слива жидкого азота). Отвод жидкого азота производится через патрубок газосброса по гибкому шлангу.
6. Производится заливка жидкого гелия. Уровень контролируется при помощи гидростатического уровнемера.
7. Когда по показаниям одного из термометров, температура в верхней части образца достигнет значения 4,2 К, на колонны домкратов краном устанавливается верхняя крестовина с крепежным элементом. Шток закрепляется на крестовине.
8. На образец подается растягивающая механическая нагрузка на растяжение со скоростью нарастания приблизительно 10 кН/мин. В процессе испытания поддерживается постоянный уровень жидкого гелия. Измерение деформации и температуры производится посредством

установленных на образец датчиков. Измерение нагрузки на образце осуществляется по давлению масла в гидравлической системе домкратов штатным датчиком «Сапфир-22МТ».

9. Разрыв образца определяется по резкому изменению показаний датчиков, сопровождаемому характерным звуком. После завершения испытания верхняя крестовина демонтируется, из криостата извлекается шток с верхним фрагментом образца и датчиками.
10. Нижний захват с фрагментом образца извлекается после отогрева криостата. Для этого используется специальный байонетный ключ. Нижний захват снабжен дополнительными крепежными элементами специально под указанный ключ.

2.13 Проведение тестового испытания при температуре жидкого азота

Для отработки методики и оценки работоспособности криостата было проведено тестовое испытание. В качестве образца был использован стальной (12Х18Н10Т) стержень диаметром 80 мм, с резьбой М80х4 на концах. Закрепление стержня производилось аналогично креплению образца в захватах. Подготовка испытания производилась в соответствии с описанной выше методикой. В качестве хладагента был использован жидкий азот, потому, что основная температурная деформация элементов криостата происходит при охлаждении от комнатной до азотной температуры. При охлаждении от температуры жидкого азота до температуры жидкого гелия, деформация элементов криостата относительно невелика. Соответственно,

при успешном прохождении тестового испытания, испытательную машину можно считать пригодной к работе.

После установки тестового образца и заливки жидкого азота, было произведено механическое нагружение со скоростью 10 кН/мин вплоть до достижения нагрузки в 450 кН. После чего, тестовый образец был разгружен и демонтирован. Испытание прошло в штатном режиме, не наблюдалось резких изменений механической нагрузки на образце или существенных изменений уровня жидкого азота. Таким образом, криостат был успешно испытан на пригодность к работе с образцами труб-оболочек.

Отдельно была произведена поверка силовой части испытательной машины. Для поверки были привлечены сотрудники ФГУ «Ростест-Москва». Был выдан соответствующий поверочный сертификат (рисунок 16).

**СЕРТИФИКАТ
о калибровке**

№ 0215342/445

Средство измерений Машина испытательная разрывная
наименование и тип F250

Пределы измерений (0-250) тс

Заводской номер 01

Изготовитель Россия

Принадлежащее РНЦ "Курчатовский институт"
наименование юридического (физического) лица
ИНН: 7734111035

Условия калибровки 20 °С, вл. 70%

Калибровка проведена по методике РД-50-482-84
номер или полное наименование нормативного документа

В качестве эталона применен динамометр 1-го разряда №130262

Начальник лаборатории 445
Подпись Перекрест В.К.

Поверитель Зенин А.Ю.
Подпись

"24" ноября 2010г.

Результаты калибровки

Показания машины, тс	Показания образцового динамометра, тс
0	0
10	10,08
20	19,92
30	29,70
40	39,76
50	49,75
100	99,31
150	149,43
200	199,62



Поверитель Зенин А.Ю.

Государственный региональный центр метрологии ФГУ Ростест-Москва
аккредитован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии
на техническую компетентность в области поверки средств измерений.

117418, Москва
Тел.: 8 (499) 744-48-02, 8 (499) 744-48-48

Нахимовский проспект, 31
Факс: 8 (499) 129-25-33

Бланк № 0215342

Рисунок 16. Поверочный сертификат на испытательную машину F-250.

ГЛАВА 3

Результаты испытаний и их анализ

3.1 Результаты испытаний труб-оболочек при комнатной температуре

Были проведены следующие эксперименты:

- испытания образцов труб-оболочек в состоянии поставки (без прохождения какой-либо предварительной обработки) на разрыв при комнатной температуре
- вытяжка образцов в состоянии поставки при комнатной температуре на 2,5 % от первоначальной длины с последующим отжигом в атмосфере чистого гелия (моделирование процессов при изготовлении катушки тороидального поля)
- испытания предварительно обработанных образцов (см. выше) на разрыв при комнатной температуре
- испытания образцов труб в состоянии поставки на разрыв при температуре жидкого гелия
- испытания предварительно обработанных образцов на разрыв при температуре жидкого гелия

Для всех типов испытаний были использованы образцы как со сварными соединениями, так и без них.

С учётом большого количества проведенных испытаний, а также однотипности полученных результатов, в настоящей работе приводятся отдельные, наиболее представительные результаты.

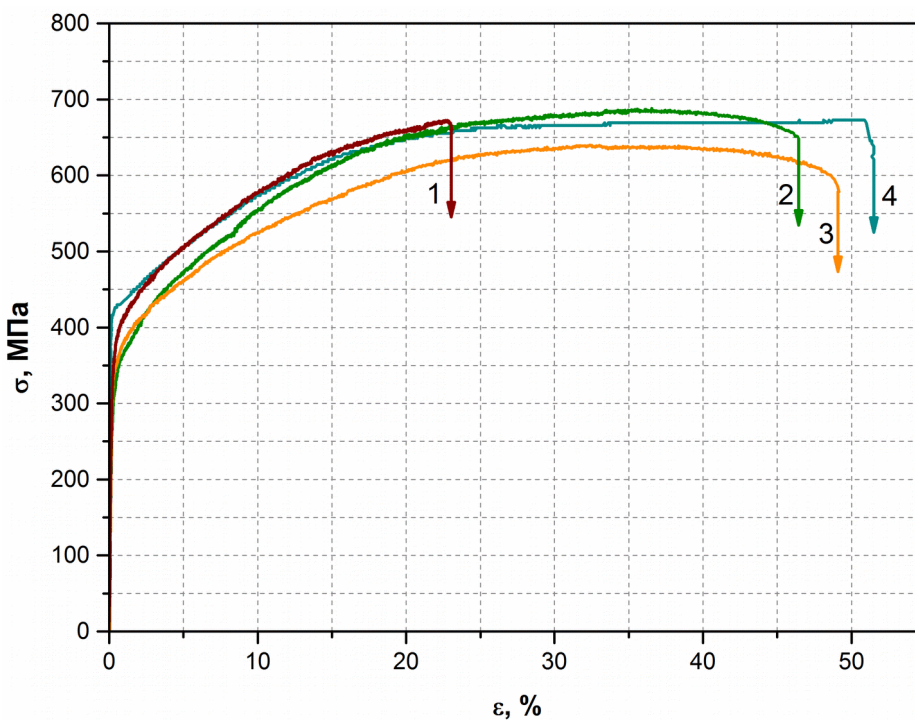
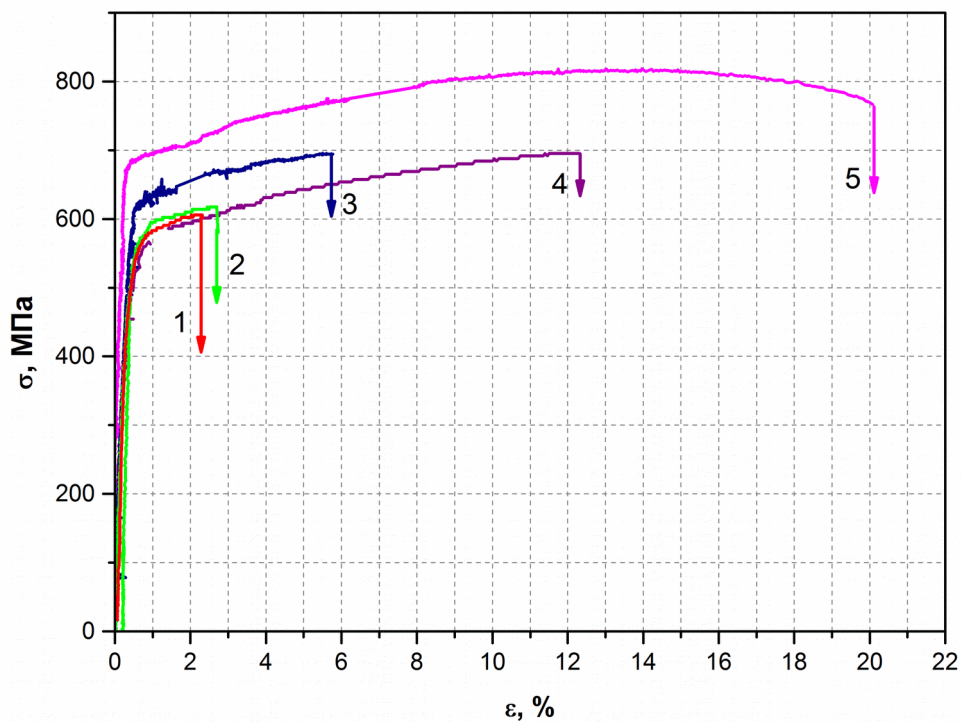


Рисунок 17. Результаты испытаний труб-оболочек в состоянии поставки

На рисунке 17 приведены результаты испытаний образцов труб-оболочек в состоянии поставки. Испытаны образцы со сварным швом (1) и без (2-4).



Рисунке 18. Результаты испытаний образцов труб-оболочек, прошедший предварительную вытяжку и отжиг.

На рисунок 18 представлены наиболее типичные результаты испытаний труб-оболочек (производства Kobe Special Tube Ltd. и Sandvik Materials Technology), прошедших процедуры компактирования и отжига. Образцы без сварного шва (3 - 5) демонстрируют большую пластичность, чем образцы со швом (1, 2).

Разрушение образцов происходило в зоне пластической деформации. Напряжение разрушения лежит в диапазоне от 595 до 770 МПа. Деформация образца при разрыве достигала значений вплоть до 48% от первоначальной длины. Разрушение происходило без образования осколков и крупных трещин на образцах. Очевидно, что наличие сварного шва и прохождение процессов отжига и предварительной вытяжки негативным образом сказывается на общих пластических свойствах труб-оболочек. Соответственно, наименьшее значение удлинения при разрушении наблюдалось у образцов со сварным швом, прошедших процедуры предварительной вытяжки и отжига. По результатам испытаний при комнатной температуре был отобран поставщик (Kobe Special Tube), чьи трубы целесообразно было испытывать при температуре жидкого гелия.

3.2 Результаты испытаний труб-оболочек при температуре жидкого гелия

Были проведены испытания на разрыв при температуре жидкого гелия. Аналогично испытаниям при комнатной температуре, были использованы образцы труб оболочек в различных состояниях. В силу того, что на момент

проведения работы испытания такого рода были уникальными, следует рассмотреть каждое из них в отдельности.

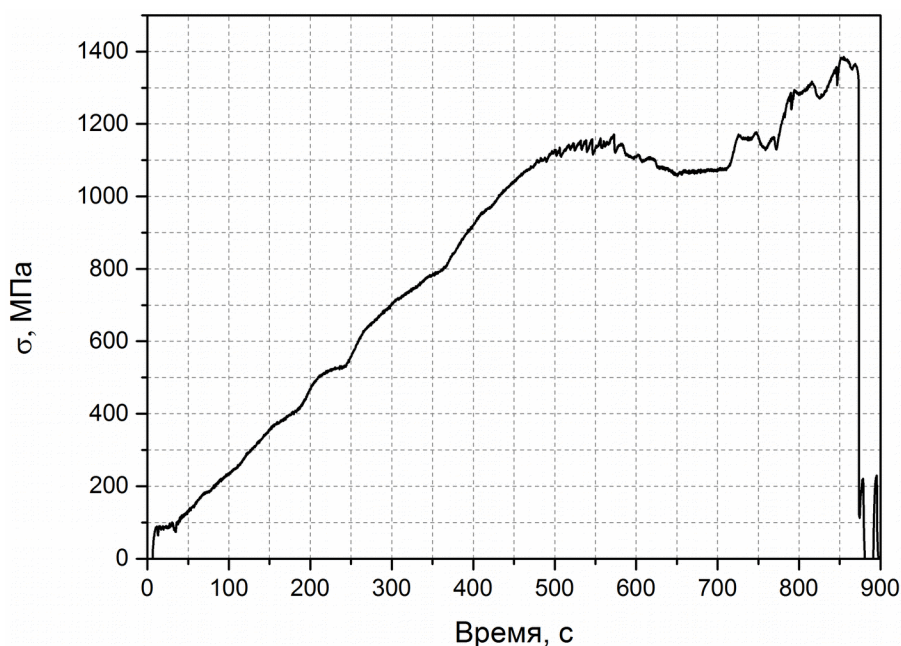


Рисунок 19. График нагружения образца трубы оболочки в состоянии поставки без сварного шва.

На рисунке 19 представлен график нагружения образца трубы-оболочки в состоянии поставки без сварного шва. Данный эксперимент был первым в серии, как следствие, при его проведении возникли трудности технического характера.

На графике видны скачки нагрузки в области пластической деформации. При этом на поверхности образца не наблюдалось полос скольжения, характерных для стандартных плоских образцов материала, прошедших аналогичные испытания. Разрыв трубы произошел в верхней части, вне установленных датчиков деформации. Это могло быть вызвано тем, что в этой области образца более существенное влияние оказывают теплопритоки от штока и захвата. Кроме того, уровень жидкого гелия в ходе испытания мог понизиться из-за нагрева системы, вызванного пластической деформацией. Таким образом, температура в верхней части образца могла возрасти, что

повлекло за собой снижение механической прочности. Несмотря на то, что это изменение могло быть относительно малым, с учётом величины механической нагрузки, оно могло стать определяющим для разрыва образца именно в этом месте.

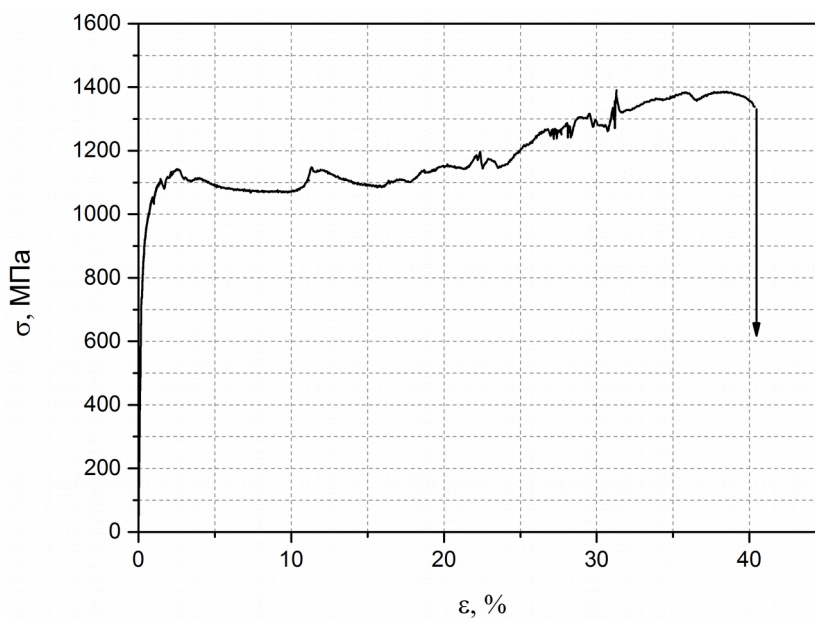


Рисунок 20. Результат испытания образца трубы-оболочки в состоянии поставки со сварным швом.

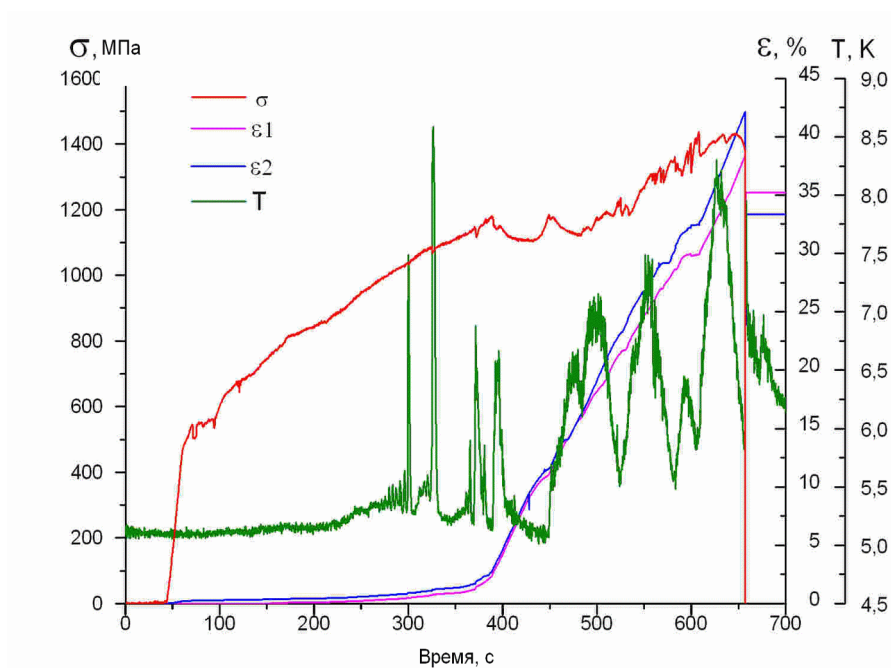


Рисунок 21. Временные зависимости параметров испытания

На рисунках 20 и 21 представлен результат испытаний образца трубы оболочки в состоянии поставки со сварным швом. В ходе данных испытаний измерялись механическая нагрузка, деформация, а также температура образца. Последняя измерялась при помощи термометра, установленного на сварной шов.

В этом эксперименте, как и в предыдущем, наблюдались скачки деформации. Как видно из графика, скачки сопровождалось резким повышением температуры. В области пластической деформации образца (приблизительно после 375 секунды) наблюдался общий рост температуры. Причинами данного явления могут выступать как собственно пластическая деформация, так и постепенное испарение гелия.

Разрыв образца произошел в верхней части, линия разрыва находилась под установленным датчиком деформации. Расположение места разрушения определялось теми же причинами, что и в первом эксперименте. Поскольку разрыв произошел не по сварному шву, можно утверждать, что по прочностным и пластическим свойствам материал шва не уступает материалу собственно трубы-оболочки. В пользу этого утверждения говорит и тот факт, что диаметр деформированного образца постоянен по всей длине области пластической деформации (кроме «шейки» в месте разрыва) – следовательно, сварной шов реагировал на воздействие механической нагрузки так же, как и основной материал трубы-оболочки.

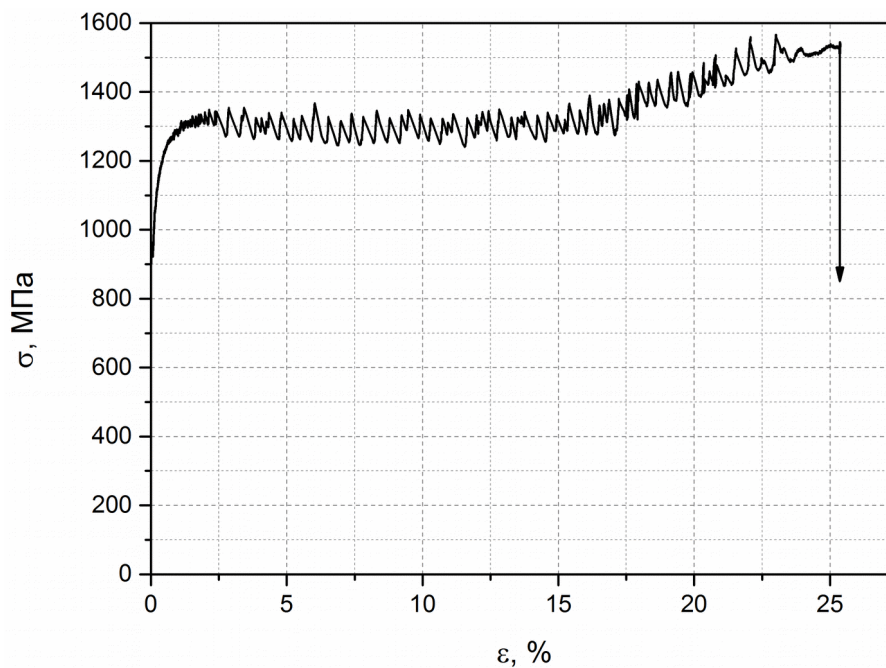


Рисунок 22. Результат испытания образца трубы-оболочки без сварного шва и прошедшей предварительные отжиг и компактирование.

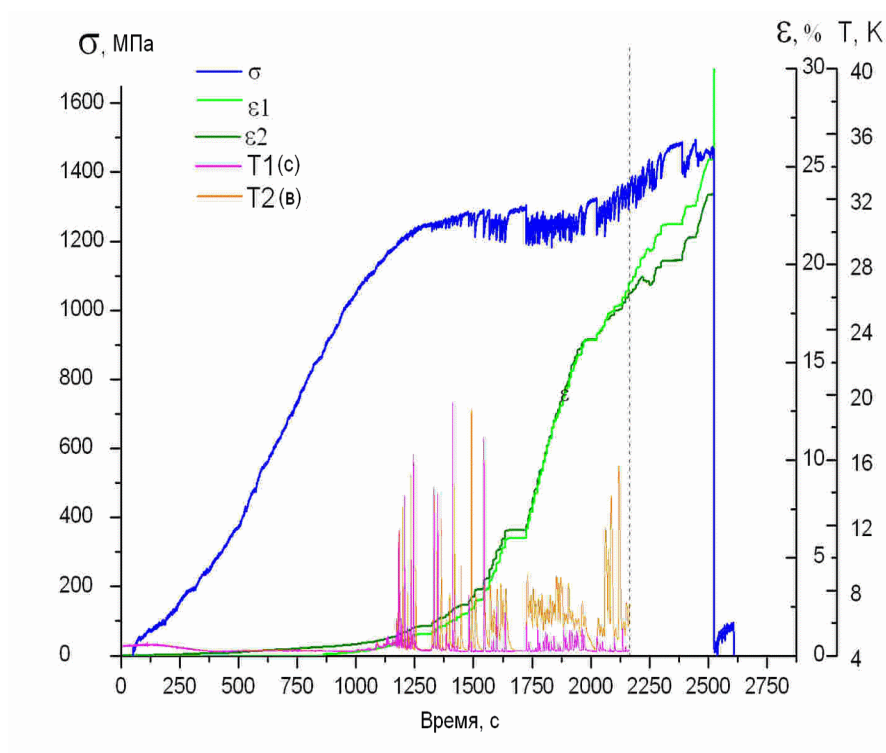


Рисунок 23. Временные зависимости параметров испытания.

На рисунках 22 и 23 представлены результаты испытаний образца трубы-оболочки без сварного шва, прошедшей процедуру компактирования и

отжига. В процессе эксперимента измерялась деформация (два датчика деформации) и температура (два термометра, установленные в верхней и средней части образца – «в» и «с» соответственно). В ходе испытания возникли технические затруднения. Приблизительно на 36-й минуте испытания произошла потеря сигнала от термометров (момент отмечен пунктиром на графике). Как и в случаях образцов труб в состоянии поставки, наблюдались скачки нагрузки, сопровождаемые скачками температуры.

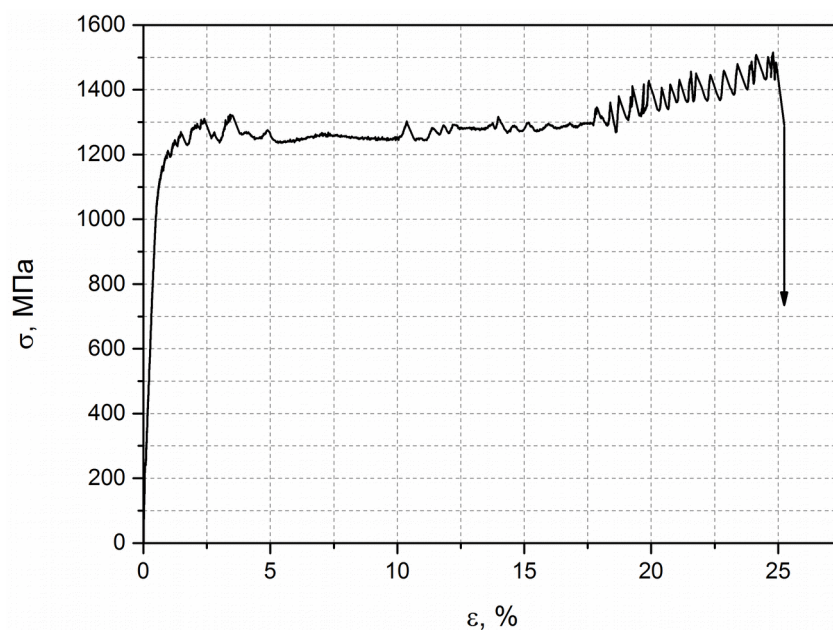


Рисунок 24. Результат испытания образца трубы-оболочки со сварным швом и прошедшей предварительные отжиг и компактирование.

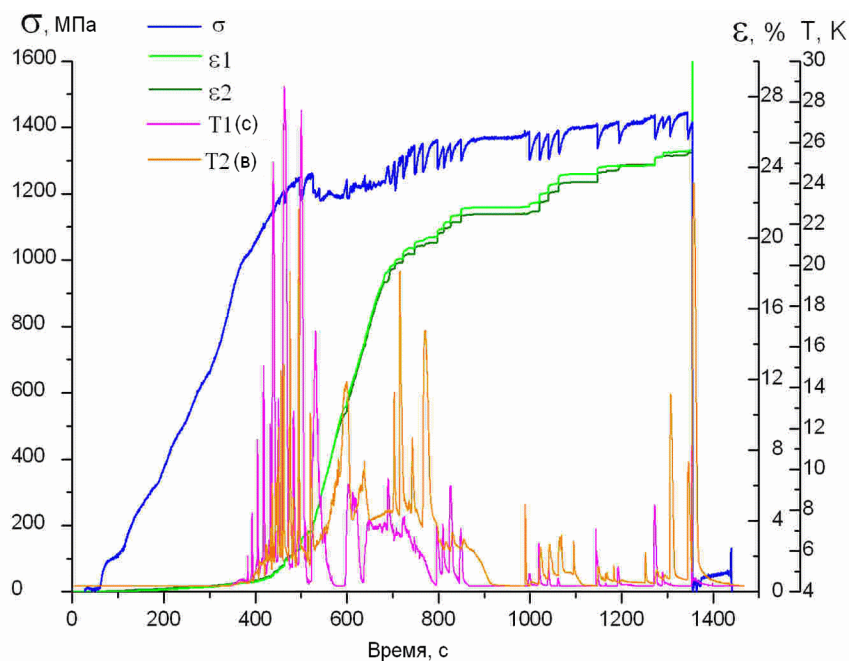


Рисунок 25. Временные зависимости параметров испытания.

На рисунках 24 и 25 представлены результаты испытания образца трубы-оболочки со сварным швом, прошедшей процедуры компактирования и отжига. Установка датчиков деформации и температуры производилась аналогично предыдущему эксперименту. Полученные графики нагружения и деформации в целом совпадают с соответствующими результатами для отожженной трубы без сварного шва. По всей видимости, наличие сварного шва слабо влияет на пластические свойства образца, в случае прохождения им компактирования и отжига (в отличие от труб в состоянии поставки, где разница в усилиях разрыва образцов со сваркой и без была существенной).

Необходимо отметить, что существующие недостатки проведенных экспериментов не являются результатом методологических ошибок. Наиболее существенной проблемой, возникшей при испытаниях, было разрушение отожженных образцов по крепежному сварному шву. Действительно, при определенных сочетаниях материалов образца и крепежного элемента использование предложенной схемы фиксации образца будет невозможным.

Тем не менее, это не создает принципиальной невозможности применения описанного в настоящей работе метода испытаний. Так существует возможность подбора соответствующего крепежного элемента для конкретного материала образца — таким образом, чтобы обеспечить необходимую прочность сварного шва. В случае с отожженным материалом труб-оболочек следует рассмотреть возможность усовершенствования технологии сварки. При подготовке описанных в настоящей работе образцов использовалась ручная электродуговая сварка в атмосфере инертного газа (аргон). Использование автоматической сварки, дополнительная очистка свариваемых поверхностей могут повысить прочностные свойства шва.

ГЛАВА 4

Разработка методов исследований физико-механических свойств ВТСП-лент второго поколения

4.1 Разработка устройств для проведения испытаний ВТСП-лент с приложением поперечной механической нагрузки

Механические испытания ВТСП-лент на расслоение проводились по методу с поперечным приложением силы. Созданы экспериментальные устройства, устанавливаемые на испытательную машину Instron 1195. Устройство состоит из стеклотекстолитовой рамы, двух латунных наковален и двух тоководных пластин. Нижняя наковальня жестко закреплена на раме станда, верхняя может перемещаться вертикально. Обе наковальни припаиваются с обеих сторон к исследуемому образцу ВТСП-ленты (ширина образца превышает ширину наковален для предотвращения их спайки между собой). Если предполагаются испытания со снятием вольтамперной характеристики, концы образца припаиваются к тоководным пластинам. Для испытаний при комнатной температуре припайка к тоководам, очевидно, не нужна, что позволяет уменьшить длину образца и сократить расход ВТСП-ленты на серию испытаний. Создано два устройства — для лент шириной 3 — 5 мм и лент шириной 10 — 12 мм. В обоих случаях площадь пятна контакта между наковальней и образцом составляет приблизительно 1 см².

Для закрепления стандов в открытом азотном криостате через байонетный захват была изготовлена стальная пластина с соответствующим крепежным элементом. Стенды прикрепляются к пластине посредством четырех винтов с резьбой М5.

Криостат представляет собой цилиндрическую емкость из нержавеющей стали с однослойной стенкой. Толщина стенки – 0,5 мм. Донце криостата снабжено двумя крепежными элементами: байонетным, внутри емкости и пальцевым – снаружи. Пальцевой крепежный элемент совместим с соответствующими установочными элементами испытательной машины “Instron 1195”. С внешней стороны стенка криостата закрыта слоем пенопласта толщиной 30 мм.

Шток выполнен из нержавеющей стали и состоит из двух стержней, соединенных между собой гайкой из стеклотекстолита. Наконечник верхнего стержня предназначен для закрепления на раме испытательной машины (пальцевой крепежный элемент, идентичный тому, что имеется на криостате). Нижний стержень оканчивается резьбой М6 и вкручивается в крепежное отверстие на латунной наковальне стенда. Стеклотекстолитовая гайка (резьба М18, размер под ключ – 32 мм) служит в качестве электроизолятора – высота гайки позволяет скрепить стержни штока, не создавая при этом электрический контакт между ними.

Токовводные пластины изготовлены из меди М3. Размеры одной пластины 25x38x5 мм. К пластинам припаяны медные провода сечением 20 мм² (стенд для образцов шириной 3 – 5 мм) или 50 мм² (стенд для образцов шириной 10 – 12 мм). Провода припаяны припоем ПОС-60 (рабочая температура 240 °С). Скрепление с силовыми кабелями от источника тока производится посредством латунных болтов с резьбой М10. Все провода покрыты изоляцией.

Для ввода тока в образец во время испытания используется программируемый источник тока на 300 А, 8 В.

Схема экспериментальных устройств представлена на рисунке 26.

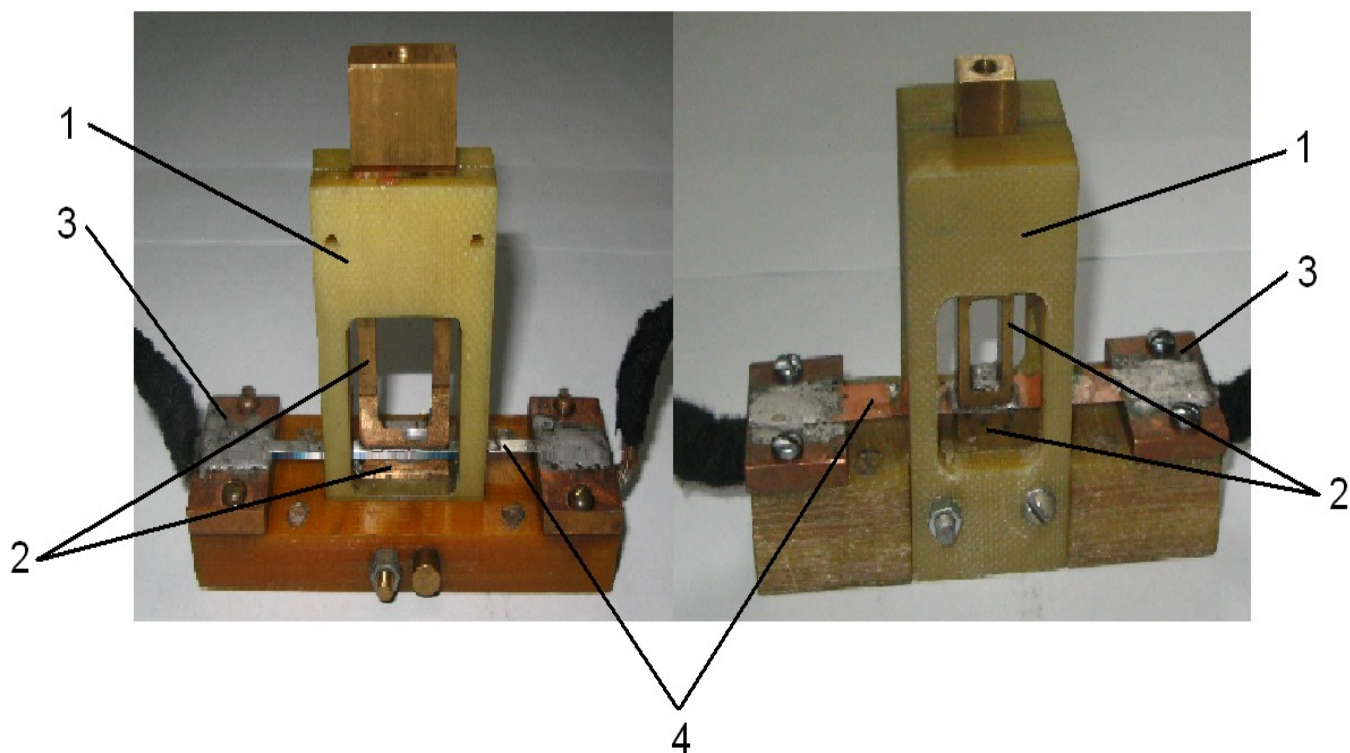


Рисунок 26. Устройства для испытаний ВТСП-лент с приложением поперечной механической нагрузки.

На схеме изображены:

1. Стеклотекстолитовые рамки
2. Латунные наковальни
3. токовводные пластины
4. Образцы (4 мм слева и 12 мм справа)

Согласно опубликованным другими авторами результатам, усилие расслоения может достигать значений порядка сотен килограмм (при пересчете на соответствующую площадь нагружения). Необходимо оценить, какие усилия выдерживают элементы стенда.

Все сегменты штока выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Верхний и средний сегменты имеют диаметр 14 мм. В соответствии с формулой (2), допустимая нагрузка на стержень с такой геометрией составляет 28310 Н. Нижний сегмент имеет шестигранное сечение с диаметром

вписанной окружности в 11 мм. Поскольку площадь правильного шестиугольника больше площади вписанной в него окружности, для грубой оценки можно рассчитать допустимое напряжение для стержня круглого сечения с диаметром 11 мм. Оно составляет 17470 Н – соответственно, допустимое напряжение для нижнего сегмента штока будет не ниже этого значения.

Сегменты штока соединяются резьбами М6 и М18х1 (через стеклотекстолитовую гайку). Резьба М6 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т согласно расчетам по формулам (3) и (4) гарантировано выдерживает нагрузку около 3 кН при комнатной температуре. Допустимая нагрузка для резьбы М18х1, соответственно, равна 32 кН.

Стеклотекстолитовая гайка снабжена резьбой М18х1. С учетом прочности материала, допустимое растягивающее усилие на гайку составляет приблизительно 15 кН.

Наковальни изготовлены из латуни Л62. Верхняя наковальня представляет собой плоскую рамку с резьбовым гнездом М6 в верхней части. Необходимо оценить допустимые нагрузки на резьбу и на саму рамку. За значение допустимого механического напряжения материала возьмем величину в 0,5 от σ_v – временной прочности материала. Т.е. для расчетной формулы (2) $\sigma = 1500 \text{ кг/см}^2$. Минимальная площадь поперечного сечения рамки равна $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ (две прямоугольные штанги со сторонами 3 и 5 мм). Для указанной выше расчетной прочности материала, допустимое усилие на рамку равно 4,5 кН.

Резьбовое гнездо М6 предназначено для установки штока. Прочностной расчет проводился аналогично тому, что выполнен для штока. С учетом принятого допускаемого напряжения материала, резьба гарантированно выдержит 2170 Н при комнатной температуре. При температуре жидкого азота прочность материала возрастает до 2900 кг/см^2 . Допустимая нагрузка на

резьбу при температуре жидкого азота составляет 4200 Н. Таким образом, использование резьбы М6 допустимо.

Нижняя наковальня закрепляется на стеклотекстолитовой рамке посредством двух штифтов из латуни Л62 диаметром 5 мм. В процессе испытания штифты подвергаются воздействию нагрузки на срез. Штифты находятся при температуре жидкого азота. Расчет производится по формулам (21), (22) и (23) для нагрузки на срез. В качестве значения допустимой прочности материала на растяжение возьмем величину 0,5 от усилия разрыва латуни Л62 при температуре жидкого азота - 295 МПа. Величина прочности на срез, используемая в формуле (21) равна, соответственно, 236 МПа. Максимальное допустимое усилие для данных условий составляет 9,3 кН — значение, достаточное для использования штифтов при закреплении наковальни.

Рамка стенда крепится к стальной пластине с шарниром под байонетный захват. Закрепление производится посредством четырех стальных винтов с резьбой М5. Методы расчета резьбы приведены выше. Для материала винтов (Ст. 3) и параметров резьбы, допустимое усилие равно приблизительно 5 кН на один винт при комнатной температуре. Соответственно, четыре винта гарантированно выдержат нагрузку в 20 кН.

Конструкция стенда для лент шириной 10 — 12 мм практически не отличается от рассмотренной выше. Основным отличием является то, что нижняя наковальня закрепляется на рамке посредством одного винта М6 из нержавеющей стали. Допустимость применения резьбы М6 при расчетных усилиях подтверждена ранее. Для стеклотекстолитовой рамки был произведен численный прочностной расчет.

4.2 Разработка устройства для проведения испытаний ВТСП-лент с приложением продольной механической нагрузки

Механические испытания ВТСП-лент на разрыв с приложением продольной нагрузки проводились на специально разработанном устройстве. Присоединительные размеры устройства позволяют устанавливать его в описанный выше азотный криостат. Устройство изображено на рисунке 27.

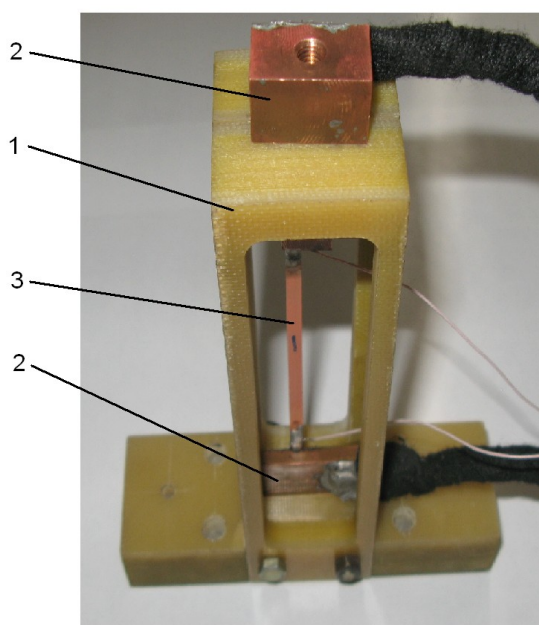


Рисунок 27. Устройство для испытаний ВТСП-лент с продольным приложением нагрузки.

Устройство состоит из стеклотекстолитовой рамки (1), на которую устанавливаются две токоведущие пластины (2). К пластинам припаяны (ПОС-60) медные провода, предназначенные для подачи тока на образец (3). Провода покрыты изоляцией и снабжены медными (пайка припоем ПОС-60) контактными пластинами для подключения к программируемому источнику тока. Верхняя пластина снабжена резьбой М6 для закрепления штока. Обе

пластины расположены в одной плоскости, для обеспечения вертикальности образца при испытании. Нижняя пластина жестко закреплена на рамке посредством двух штифтов диаметром 4 мм. Верхняя пластина может свободно перемещаться по вертикали. Пластины, не только являются токовводами, но и служат крепежом для образца. Для закрепления ВТСП-ленты используется паяное соединение (сплав Вуда в качестве припоя), длина пайки равна примерно 12 — 15 мм. Эффективная длина образца при этом составляет 75 мм. К образцу также подпаиваются (сплав Вуда) потенциальные выводы. Расстояние между контактами — не менее 70 мм.

Исходя из результатов, приведенных в тематической литературе, максимальное усилие при испытании не превысит значения в 500 — 700 Н. Таким образом, единственными элементами, требующими оценки прочности являются токовводные пластины.

4.3 Описание технологии пайки

Для пайки допустимо использование припоев с температурой плавления до 170 °С. Несмотря на то, что ВТСП-ленты могут выдерживать непродолжительный нагрев до 200 градусов без каких либо последствий, использование припоев с рабочей температурой выше 170 °С нежелательно. Технология пайки подразумевает одновременный прогрев обеих наковален, использование припоев с рабочей температурой 170 °С или выше потребует либо дополнительной мощности паяльника, либо существенно увеличит время подготовки единичного испытания. Кроме того, повышается вероятность перегрева ленты, последствия которого будут изложены ниже.

В описываемой работе использовались следующие припои: сплав Розе (50% висмута, 28% свинца, 22% олова, рабочая температура 100 градусов

Цельсия), оловянно-висмутовый сплав (43% олова, 43% свинца, 14% висмута, рабочая температура 160 °С), ПОСК 50-18 (30,6% свинца, 18,2% кадмия, 51,2% олова, рабочая температура 142 °С) и сплав Вуда (24,9% свинца, 50,1% висмута, 10,8% кадмия, 14,2% олова, рабочая температура 65,5°С). Во всех случаях применялся неактивный индикаторный флюс-гель “ТТ” (КРС-78, вазелин, эмульгатор, тетраэтиленгликоль). Температура жала паяльника определялась исходя из типа припоя: облуживание образца производилось при рабочей температуре припоя (исключая сплав Вуда – в этом случае температура жала была равна минимально возможным 100°С), прогрев наковален при финальной спайке требовал повышения температуры жала на 20 - 30°С относительно рабочей температуры. Отработка технологии пайки образцов показала следующие результаты: сплав Розе малоприспособен для использования при механических испытаниях из-за склонности паяного соединения к растрескиванию под воздействием механических нагрузок. Испытания образцов, припаянных к наковальням сплавом Розе, не давали результатов из-за разрушения спая до момента расслоения собственно образца. Оловянно-висмутовый сплав пригоден к использованию, однако требует повышенной осторожности при подготовке испытания — из-за относительно высокой температуры плавления велика вероятность порчи образца при прогреве наковален. Кроме того, высокая рабочая температура делает припой абсолютно не пригодным для использования с определенными типами образцов. Тем не менее, данный сплав был задействован в ряде испытаний лент шириной 4 мм. ПОСК 50-18 не показал удовлетворительных результатов при пайке. Образцы, в подготовке которых был задействован ПОСК, были перегреты, несмотря на соблюдение температурного режима (в случаях пайки при той же температуре жала паяльника, но с другими припоями, подобного не наблюдалось). Использование сплава Вуда дало наилучшие результаты — низкая рабочая температура пайки практически полностью исключает

вероятность перегрева образца, при этом сплав обладает необходимой механической прочностью.

Для припайки к образцу потенциальных выводов использовались сплав Розе или сплав Вуда – в силу низкой температуры пайки их применение представляется наиболее целесообразным.

4.4 Методика испытаний ВТСП-лент с приложением механической нагрузки поперечной механической нагрузки

После установки криостата со стендом на испытательную машину, в зависимости от типа проводимого испытания проводятся следующие действия:

- В случае испытаний при комнатной температуре верхняя наковальня стенда присоединяется к раме посредством штока. Далее, к образцу можно прикладывать механическую нагрузку.
- В случае испытаний при температуре жидкого азота, шток устанавливается на верхнюю наковальню стенда и выставляется по высоте, однако закрепление штока на раме не производится. В зависимости от того, будет ли сниматься вольтамперная характеристика, токовводные пластины подключаются к источнику тока. После этого, криостат заполняется жидким азотом. Далее, необходимо дать криостату, стенду и штоку остыть до рабочей температуры, что занимает 10 – 15 минут. Только после этого шток можно окончательно выставить по высоте и закрепить на раме – таким образом образец защищается от воздействия температурного сжатия штока и других элементов установки.

Несмотря на то, что величина нагрузки, вызываемая температурным сжатием невелика относительно средней нагрузки расслоения, скорость ее роста в момент заливки жидкого азота может быть недопустимо высокой.

Режим подачи механической нагрузки на образец может быть непрерывным или ступенчатым. Как следует из названия, в одном случае образец нагружается прерывисто, в другом — нагрузка на образце увеличивается с постоянной скоростью. Оба метода могут быть применены как для криогенных испытаний, так и для экспериментов при комнатной температуре. Рассмотрим эти способы подробнее.

В ступенчатом режиме нагрузка подается на образец прерывисто, с шагом 100 – 200 Н. На каждом шаге снимается вольтамперная характеристика. Величина механической нагрузки первого шага выбирается исходя из статистики по образцам данного типа. Скорость роста механической нагрузки во всех испытаниях (за некоторыми исключениями) составляет 0,05 мм/мин (минимально возможная скорость испытательной машины). В некоторых случаях кратковременно использовался режим нагружения со скоростью 10 мм/мин. В частности, для начальной выборки люфтов испытательного стенда, или при необходимости сократить время испытания образца, поведение которого предсказуемо по предыдущим экспериментам. Вольтамперная характеристика снимается в режиме ввода тока со скоростью 0,5 А/с, с уменьшением до 0,25 А/с при приближении к значению критического тока. Критическим током образца считается ток, при котором падение напряжения на образце достигает 1 мВ/см. Описанный способ позволяет получить зависимость критического тока образца от приложенной к нему механической нагрузки на расслоение. В случае деградации токонесущей способности, полученный результат позволит наблюдать динамику процесса.

Существенным недостатком данного способа является зависимость от статистики испытаний. Рассмотрим этот момент более подробно.

Для получения более точного графика процесса деградации токонесущей способности следует увеличить количество замеров критического тока, особенно при механических нагрузках, близких к нагрузке расслоения. Это, естественным образом, влечет за собой увеличение числа шагов по нагрузке и, соответственно уменьшение величины каждого шага. Момент, когда следует начать уменьшать шаг по механической нагрузке можно приблизительно определить только исходя из результатов предыдущих экспериментов. В случае же наличия разброса по результатам, определение предположительного момента расслоения, а, следовательно, и режима нагружения, может быть весьма затруднительным. Подобный разброс, в свою очередь, наблюдается даже для образцов одного типа и производителя, но взятых из разных партий. Таким образом, полученный график деградации токонесущей способности будет усредненным для всех образцов. В случае, если процесс занимает относительно малое время и происходит непосредственно перед расслоением образца, видимая деградация может не наблюдаться.

В непрерывном режиме нагружения испытание выполняется следующим образом: после приведения стенда в рабочее состояние, на образец подается ток, равный 95% от критического (допустимы другие значения, близкие к значению критического тока, определяемые возможностями оборудования). Далее выполняется механическое нагружение образца с постоянной скоростью вплоть до его разрушения. Момент начала деградации токонесущей способности определяется по росту электрического напряжения на образце. Таким образом, результатом эксперимента, выполненного в данной технике, будут зависимости тока, механического и электрического напряжений на образце от времени. Данная методика позволяет определить механическое напряжение, при котором происходит переход образца в нормальное

состояние для заданного значения тока. Допустима возможность разгрузки образца, изменения значения тока, и повторного нагружения. Однако здесь следует учитывать фактор усталостных разрушений. При многократном циклическом нагружении, на ВТСП-слое образца могут образоваться трещины, что существенно снизит достоверность полученных в дальнейшем результатов.

4.5 Методика испытаний ВТСП-лент с приложением продольной механической нагрузки

Методика испытаний с продольным приложением механической нагрузки практически не отличается от таковой для испытаний на расслоение, а именно — со ступенчатым увеличением усилия на образце. Испытание проводится следующим образом:

- Устройство закрепляется в криостате через байонетный захват.
- Криостат устанавливается на траверс испытательной машины, производится подключение источника тока и вольтметра
- К верхней пластине стенда присоединяется шток, траверс криостата выставляется по вертикали. Шток не фиксируется в захвате датчика силы.
- В криостат заливается жидкий азот в количестве, достаточном для полного покрытия стенда
- Осуществляется измерение критического тока при нулевой механической нагрузке на образце
- После охлаждения штока производится его окончательное закрепление на датчике силы

– Механическая нагрузка подается на образец с шагом в 5 кгс. Скорость движения траверса составляет 0,05 мм/мин. Допустимо увеличение скорости до 10 мм/мин при нагрузках до 10 кгс — для быстрой выборки люфтов установки.

– На каждом шаге по нагрузке измеряется критический ток образца.

– При приближении к области пластической деформации (определяется по изменению угла наклона кривой нагружения) шаг допустимо уменьшить до 2,5 кгс

– При снижении критического тока образца до значений в диапазоне 25 — 40 А, измерения тока можно прекратить, и продолжить нагружать образец непрерывно с большей скоростью, вплоть до его разрыва.

В результате испытания будет получена зависимость критического тока образца от приложенной продольной поперечной механической нагрузки. Таким образом, можно наблюдать процесс деградации токонесущей способности ВТСП-ленты под воздействием растягивающего усилия.

4.6 Результаты испытаний ВТСП-лент на расслоение

Проведены испытания на расслоение ВТСП-лент следующих типов:

- лента производства SuperPower с медным стабилизатором, общей толщиной 100 мкм, шириной 4 мм. Лента произведена путем нанесения ReBCO на подложку из хастеллоя методом осаждения из газовой фазы (MOCVD), с последующим нанесением защитного серебряного покрытия и медного стабилизатора.
- лента производства AMSC толщиной 200 мкм, шириной 4,8 мм. Лента произведена по технологии осаждения металло-органических

соединений (MOD) на подложку, обработанную по методу биаксиального текстурирования с помощью прокатки (RABiTS). Проводник имеет серебряное защитное покрытие, на которое напылен стабилизатор из луженой медной фольги.

- ленты производства SuperPower шириной 12 мм. Технология производства аналогична использованной при создании лент шириной 4 мм. На отдельных образцах лент отсутствовало стабилизирующее медное покрытие.

Наибольшее число экспериментов было произведено с лентами SuperPower шириной 4 мм.

Фактически результатом экспериментов по расслоению стал набор вольт-амперных характеристик, измеренных для каждого значения приложенной поперечной механической нагрузки. По вольт-амперной характеристике можно определить значение критического тока проводника. Таким образом, можно получить зависимость критического тока проводника от приложенной поперечной механической нагрузки. На графиках, приведенных ниже (рисунки 28 – 31), критический ток образца нормирован на значение при нулевой механической нагрузке.

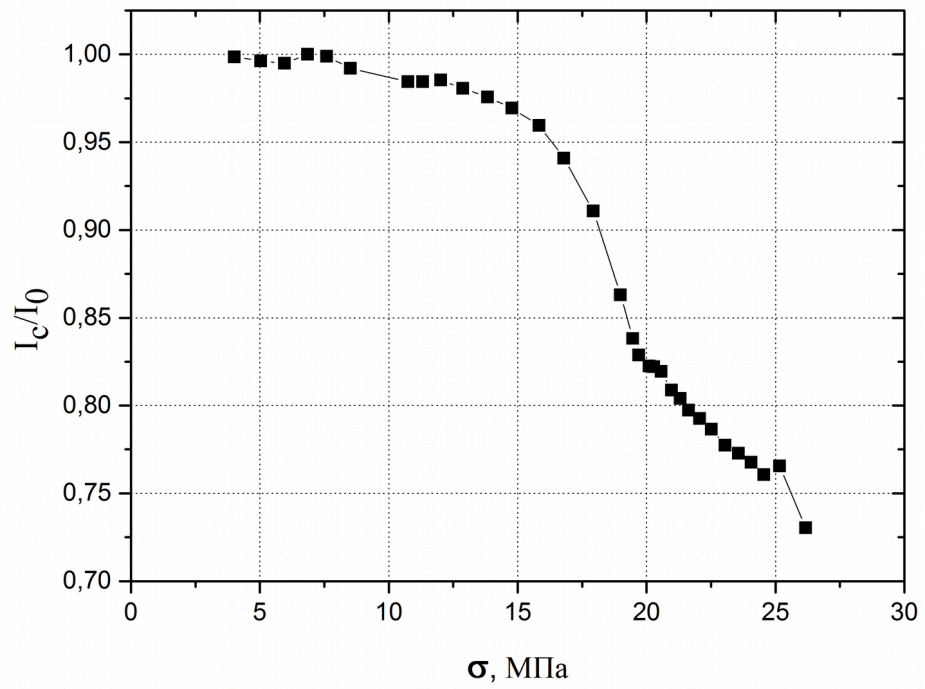


Рисунок 28. Результат испытания ленты SuperPower, шириной 4 мм

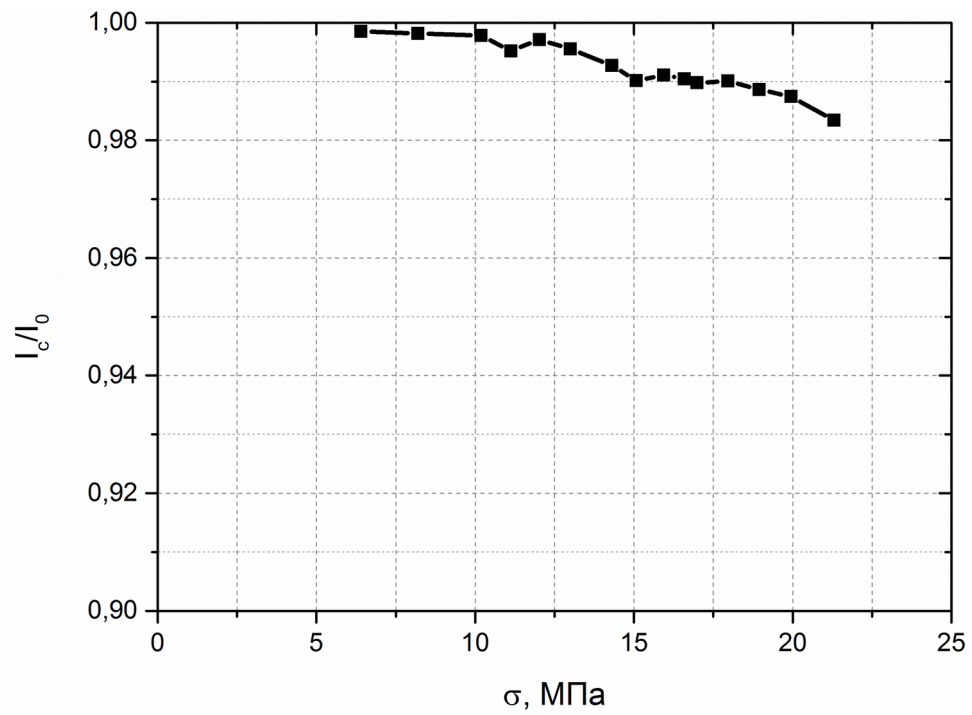


Рисунок 29. Результат испытания ленты SuperPower, шириной 4 мм

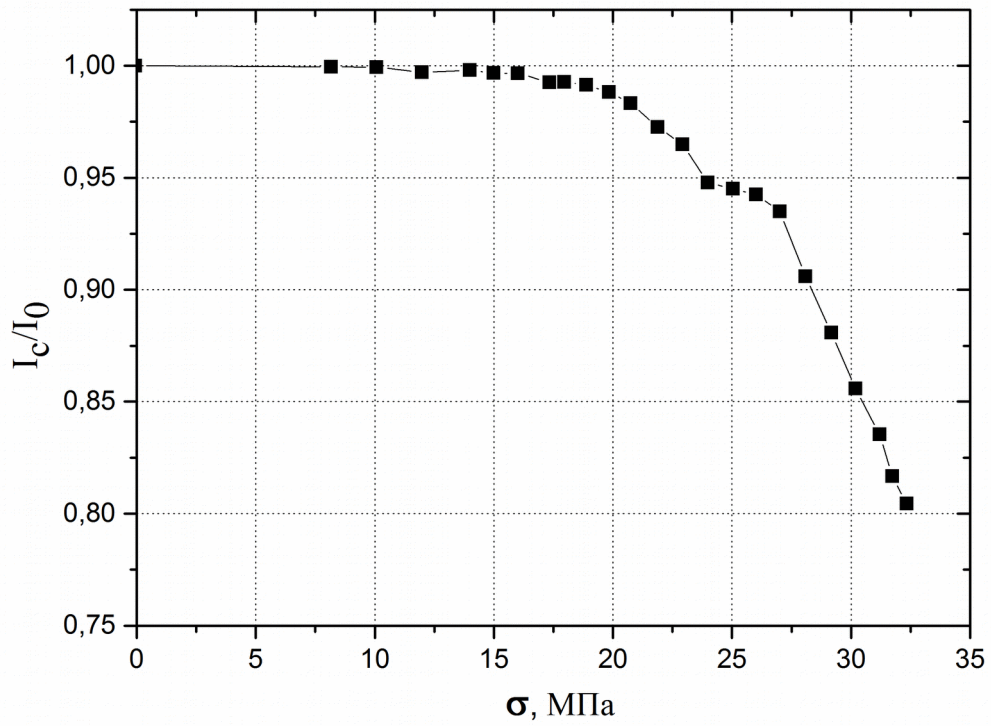


Рисунок 30. Результат испытания ленты SuperPower, шириной 4 мм

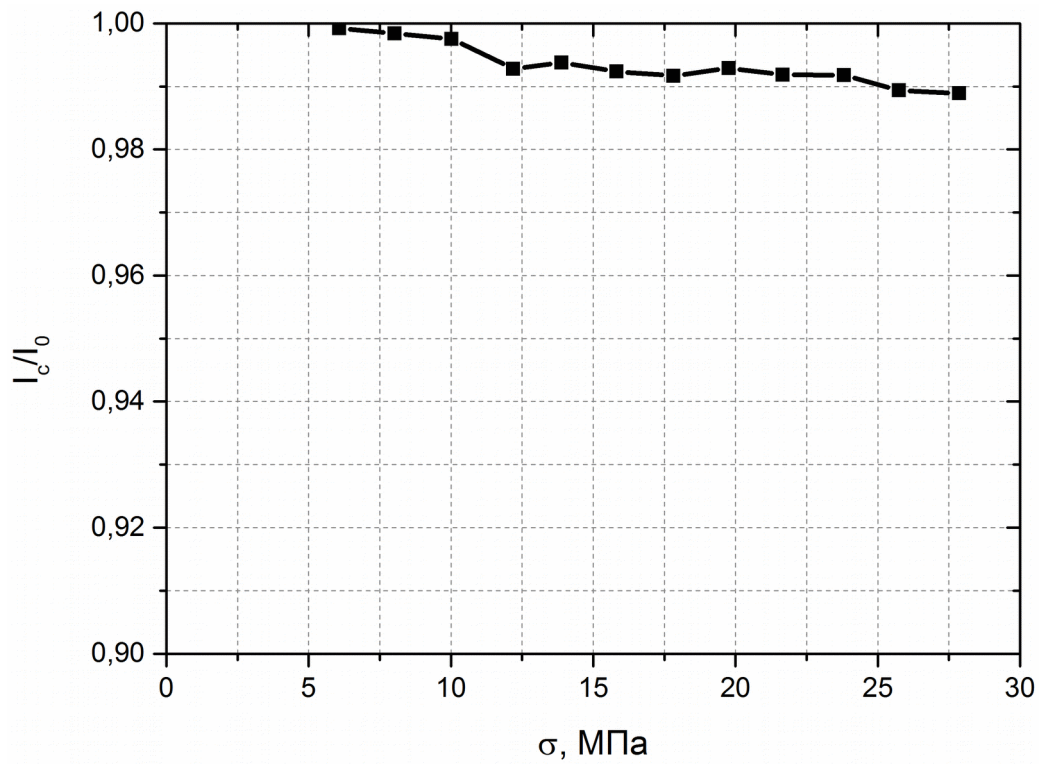


Рисунок 31. Результат испытания ленты SuperPower, шириной 4 мм

Представлены наиболее типичные результаты экспериментов а также два нестандартных случая (рисунки 28 и 30).

Как видно на представленных графиках, практически во всех экспериментах наблюдалась крайне слабо выраженная зависимость критического тока образцов от механической нагрузки. Расслоение лент происходило скачкообразно, без возможности наблюдать деградацию токонесящей способности.

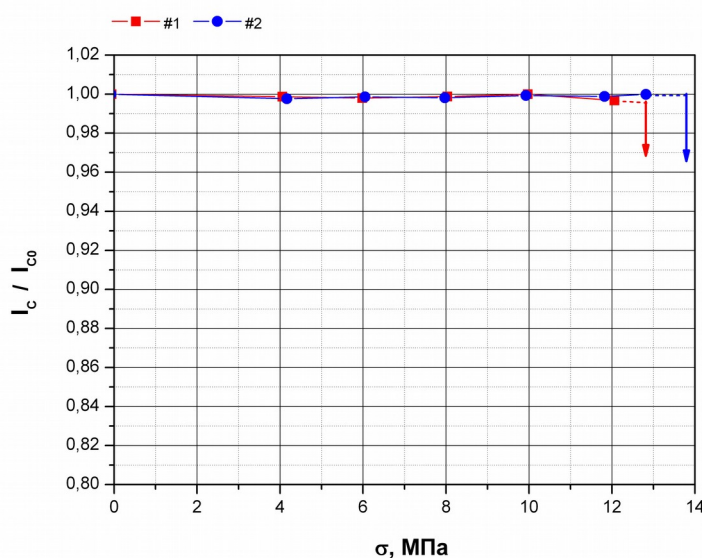


Рисунок 32. Результаты испытаний лент производства AMSC шириной 4,8 мм

На рисунке 32 представлены типичные результаты испытаний ВТСП-лент AMSC. В целом, наблюдаемая картина схожа с результатами по лентам SuperPower с точностью до числовых значений напряжений расслоения.

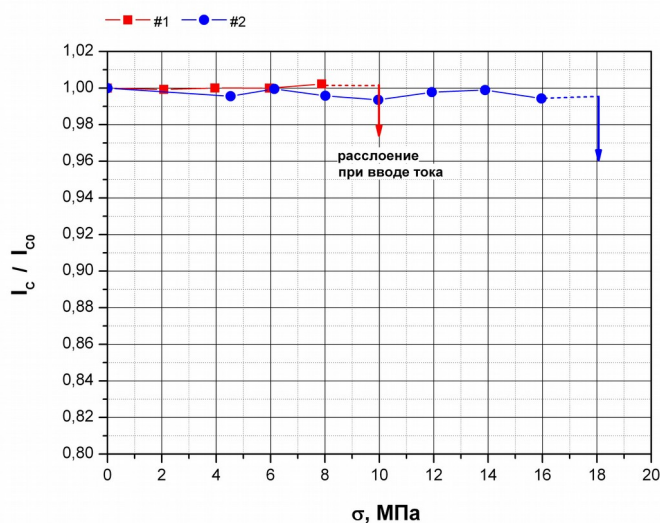


Рисунок 33. Результаты испытаний лент производства SuperPower шириной 12 мм

На рисунке 33 представлены типичные результаты испытаний лент SuperPower шириной 12 мм без медного стабилизирующего слоя. Несмотря на отсутствие медного покрытия и большую ширину, полученные результаты для данного типа лент схожи с результатами, полученными на лентах SuperPower шириной 4 мм.

В отдельных случаях наблюдалось аномальная реакция образцов на поперечную механическую нагрузку. В двух испытаниях лент SuperPower шириной 4 мм было зарегистрировано существенное снижение токонесущей способности. Этот результат требует отдельного обсуждения, поскольку указанные эксперименты проводились при стандартных условиях. Кроме того, другие образцы из той же партии не давали схожих результатов.

Причиной различий в результатах может быть один из трех факторов: отличия в образцах, отличия в подготовке эксперимента или же в условиях его проведения. Как уже было сказано, образцы или режим испытаний не имели явных особенностей. Существует два фактора, способных повлиять на существенные изменения полученных результатов: случайные отклонения образца системы от вертикали (как следствие, возникновения дополнительных

угловых усилий) и дефекты сая, создающие концентраторы напряжений. Если предположить, что определяющей является точность позиционирования экспериментальной системы относительно вертикали, то число полученных «аномальных» и «нормальных» результатов должно быть приблизительно одинаковым, тогда как фактически их соотношение составляет примерно 1 к 10. Данный вывод делается на основании того, что вертикальность экспериментальной системы определялась только положением присоединительных гнезд испытательной машины, и, как следствие отклонения должны возникать достаточно часто по чисто техническим причинам.

4.7 Анализ полученных результатов. Сравнение их с существующей численной моделью

Рассмотрим подробнее фактор дефектов спая, порождающих концентраторы напряжений. В статье [61] приводится описание созданной авторами численной модели, описывающей распределение напряжений в системах, аналогичной той, что описана в данной диссертации.

В предложенной модели рассматривалось три случая поперечного растяжения ВТСП-лент на основе GdBCO с применением наковален разной ширины: площадь пайки составляла 4x8 мм, 3x8 мм и 2x8 мм (при ширине образца 4 мм). При этом, предполагалось, что толщина слоя припоя относительно мала (но не пренебрежимо мала), и отсутствуют наплывы или иные дефекты. Иллюстрации из статьи приведены на рисунках 34 и 35.

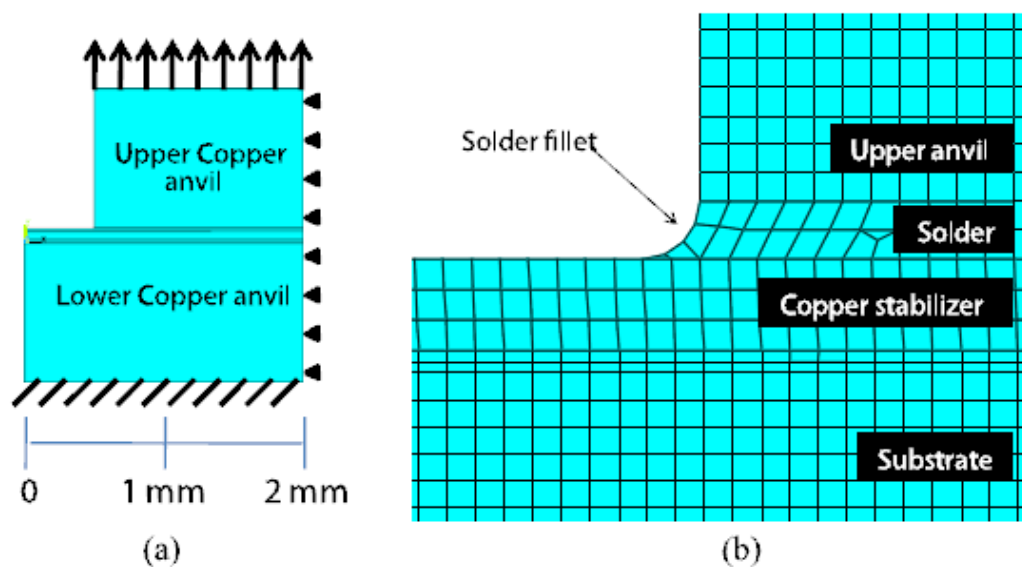


Рисунок 34. Модель для расчета распределения напряжений методом конечных элементов.

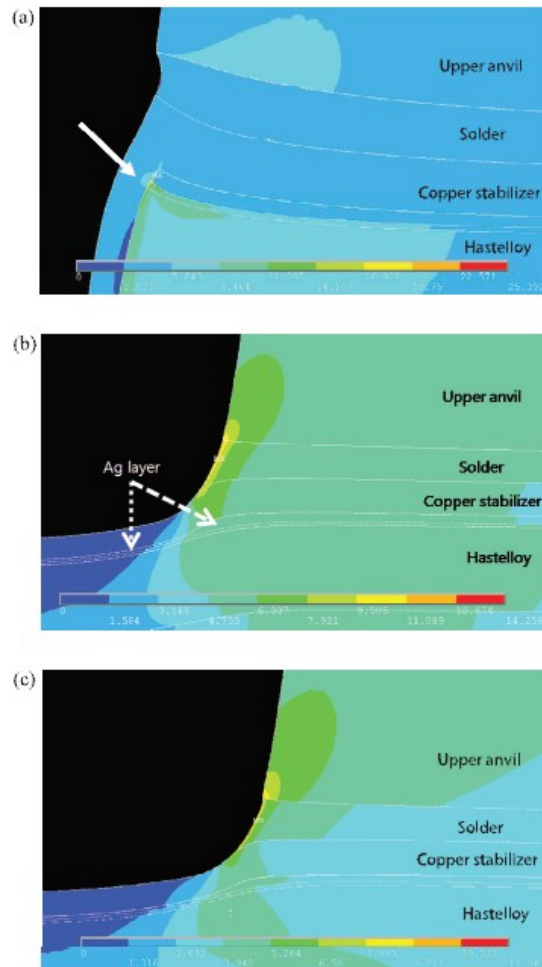


Рисунок 35. Результаты численных расчетов.

Согласно полученным расчетным данным, при приложении растягивающей механической нагрузки, концентраторы напряжений возникают на границах слоев: в зависимости от ширины наковальни, наибольшее механическое напряжение возникает либо на границе припой-наковальня, либо внутри ВТСП-ленты в области границы буферных слоев и сверхпроводящего слоя. При этом авторами модели утверждается, что распределение напряжений внутри ленты смещается в сторону медного стабилизирующего слоя вместе с уменьшением ширины наковальни.

Сопоставим сказанное выше с полученными экспериментальными результатами. В описанных в настоящей диссертации экспериментах использовалась наковальня шириной 3 мм, что соответствует конфигурации

«b» численной модели. В соответствии с расчетами, концентратор напряжений в этом случае приходится на слой припоя. При этом, наибольшее число повреждений, вызванных растягивающим напряжением, должно возникать в медном стабилизирующем слое. Здесь мы наблюдаем совпадение эксперимента с численной моделью: в случае, когда слои припоя и меди работают в качестве амортизатора, сверхпроводящий слой образца должен оставаться неповрежденным даже при наличии существенных внешних механических напряжений – что и наблюдается в большинстве полученных экспериментальных результатов.

Если же при пайке допущено возникновение достаточно крупных наплывов, то геометрия экспериментальной системы может перейти в категорию «а» численной модели (хотя бы на отдельных участках спая). В этом случае, как показывают расчеты, концентраторы напряжений возникнут уже внутри ВТСП-ленты. Таким образом, повреждения сверхпроводящего слоя начнут возникать вместе с возрастанием механической нагрузки. Как следствие, будет наблюдаться снижение токонесущей способности образца. Заметим, что в зависимости от размеров наплывов будут различаться размеры участков ВТСП-слоя образца, подвергающиеся разрушению – как следствие, скорость снижения токонесущей способности будет разной для разных спаев.

Таким образом, можно сделать вывод о природе полученных «аномальных» результатов: возникновение дефектов пайки (наплывов) при подготовке испытаний вызвало перераспределение механических напряжений внутри образца, что и повлияло на характер полученных результатов. Следует отметить, что сравнение результатов, полученных для лент AMSC, с описанной аналитической моделью было бы некорректно в силу существенного отличия конструкции испытываемых лент. В первую очередь это относится к способу нанесения стабилизирующего слоя – т.к. в случае AMSC

медное покрытие наплавляется, создавая дополнительные амортизирующие слои, которые, в свою очередь, отсутствуют в расчетной модели.

4.8 Результаты испытаний ВТСП-лент с приложением продольной механической нагрузки

Ниже (рисунки 36 – 46) приведены полученные экспериментальные зависимости токонесущей способности ВТСП-лент от продольной механической нагрузки.

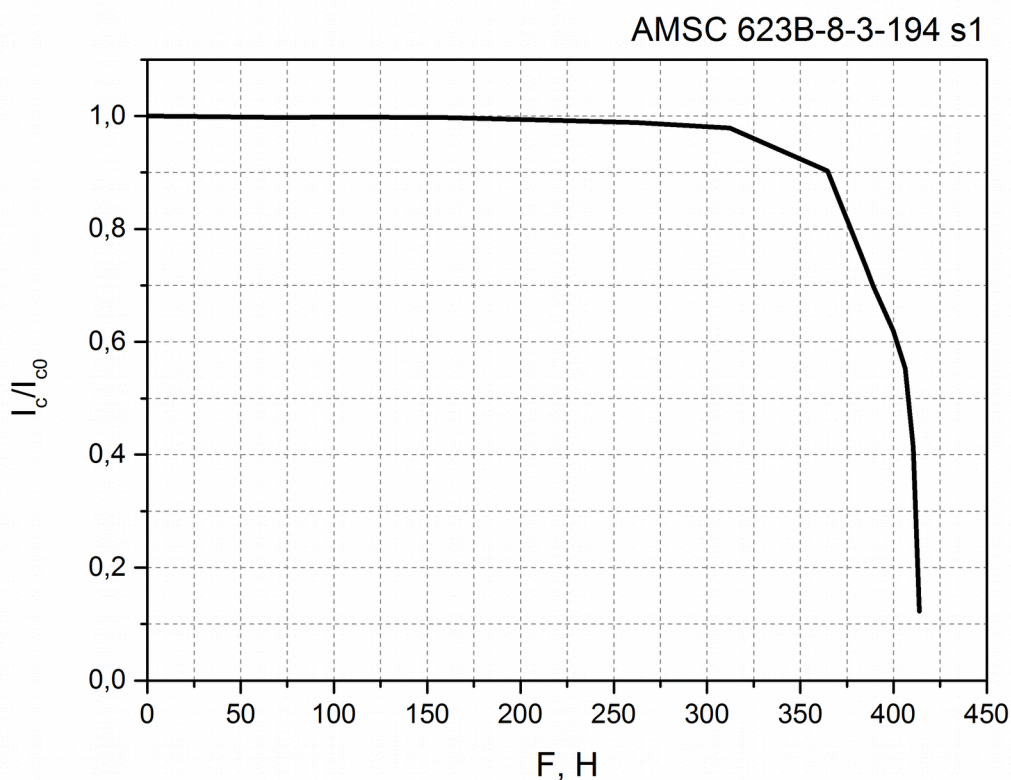


Рисунок 36. Результат испытания на растяжение ленты AMSC

Характер поведения ВТСП-лент под действием продольной механической нагрузки наглядно представлен на рисунке 36. Четко виден квазилинейный участок зависимости критического тока от приложенного

усилия, и последующая резкая деградация токонесущей способности. Схожая картина наблюдалась во всех экспериментах.

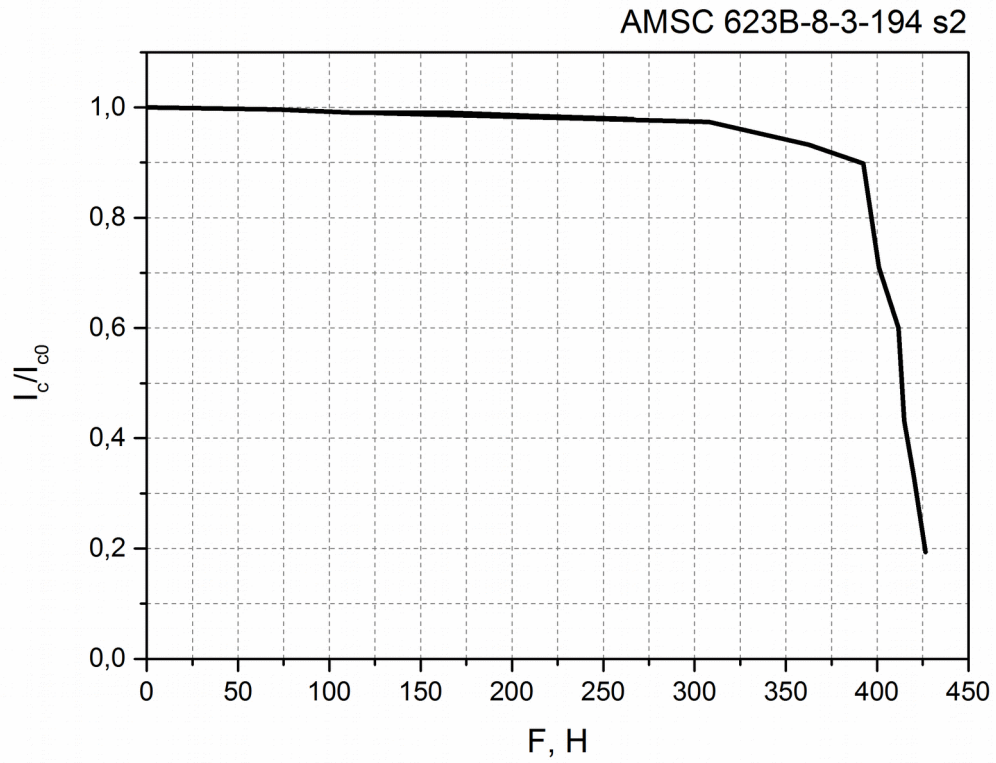


Рисунок 37. Результат испытания на растяжение ленты AMSC

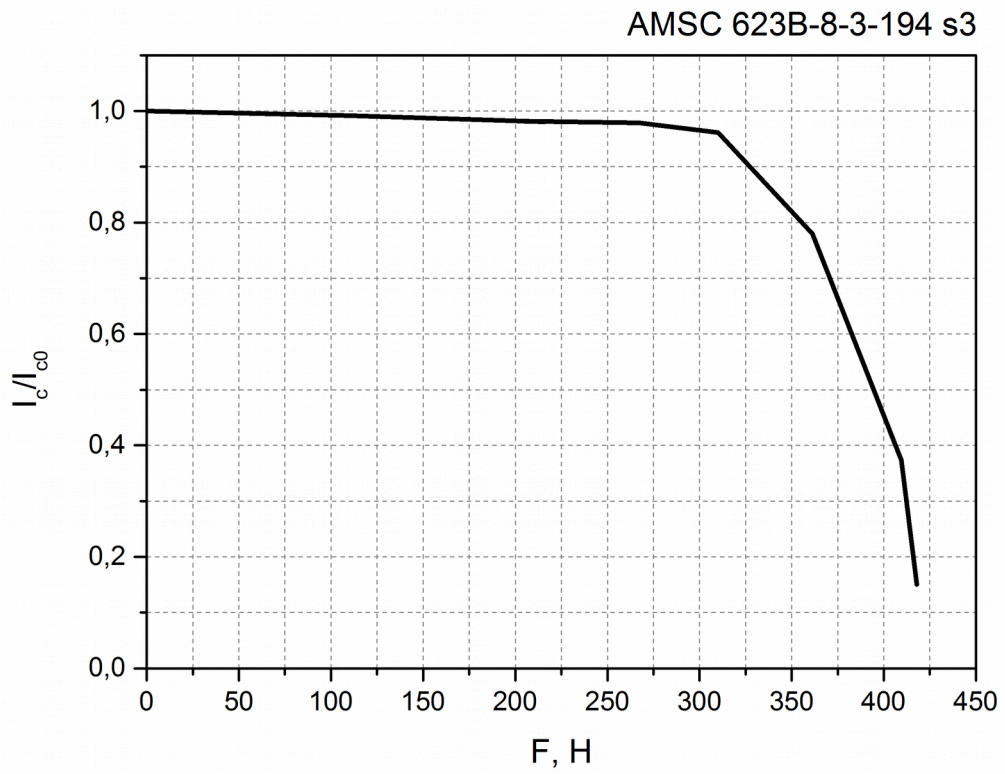


Рисунок 38. Результат испытания на растяжение ленты AMSC

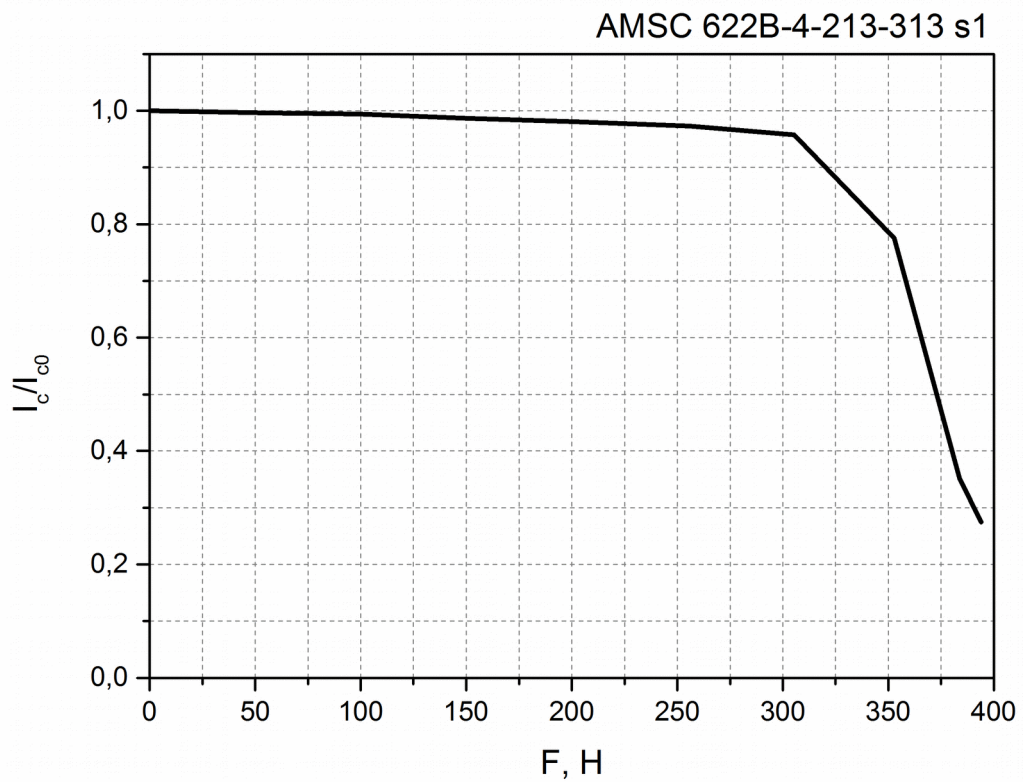


Рисунок 39. Результат испытания на растяжение ленты AMSC

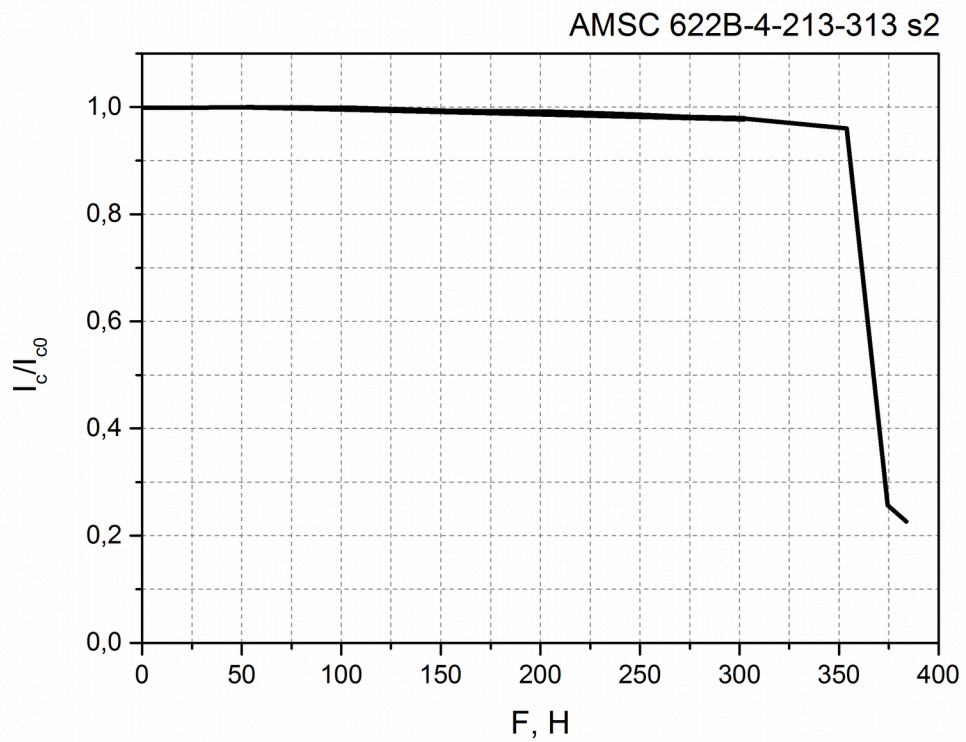


Рисунок 40. Результат испытания на растяжение ленты AMSC

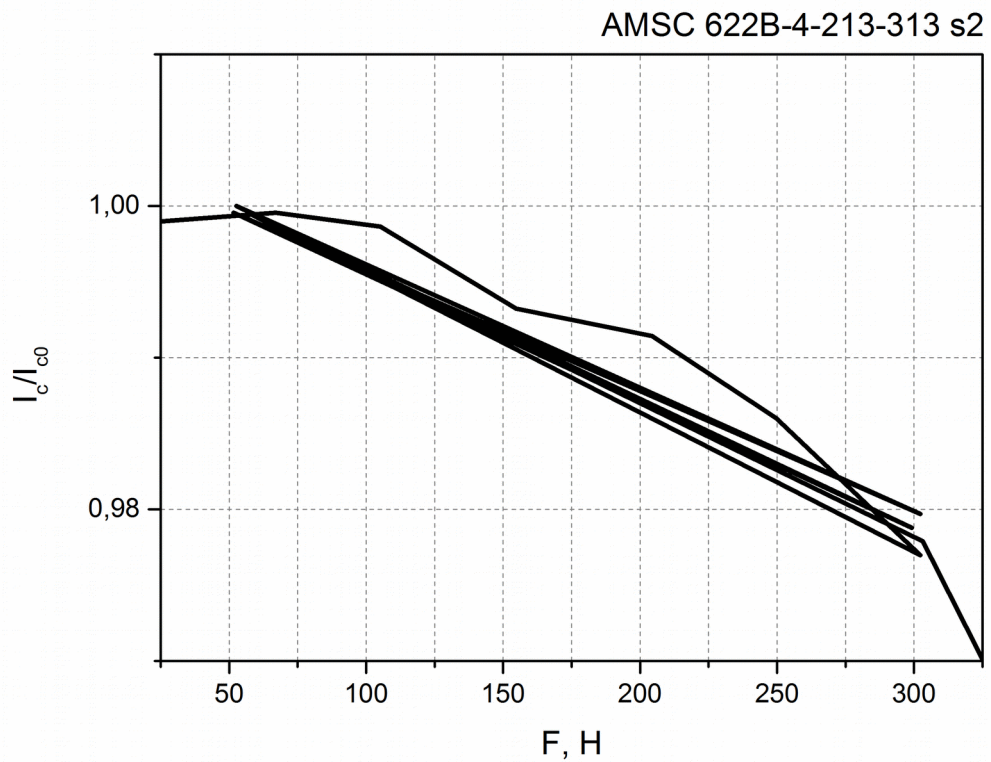


Рисунок 41. Увеличенный фрагмент графика (Рис. 40)

В процессе испытания, представленного на рисунках 40 и 41, было произведено циклическое нагружение образца в диапазоне усилия от нулевого до 300 Н. Верхняя граница по силе была выбрана исходя из предыдущего опыта таким образом, чтобы избежать необратимого повреждения образца. Как видно на рисунке 41, при механическом разгрузении образца, критический ток возвращается к исходному значению.

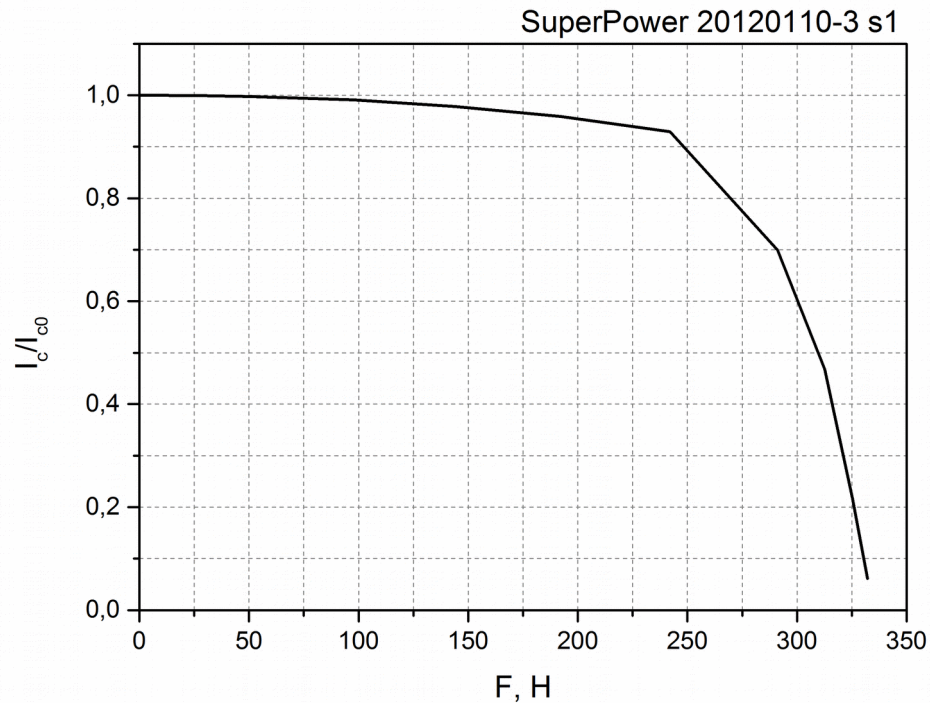


Рисунок 42. Результат испытания на растяжение ленты SuperPower

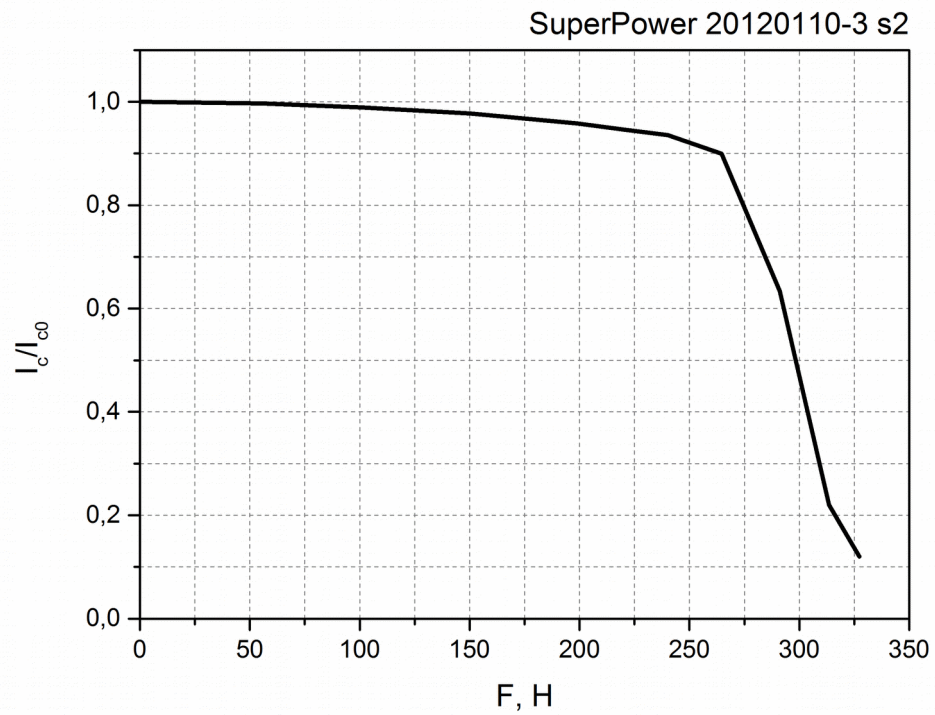


Рисунок 43. Результат испытания на растяжение ленты SuperPower

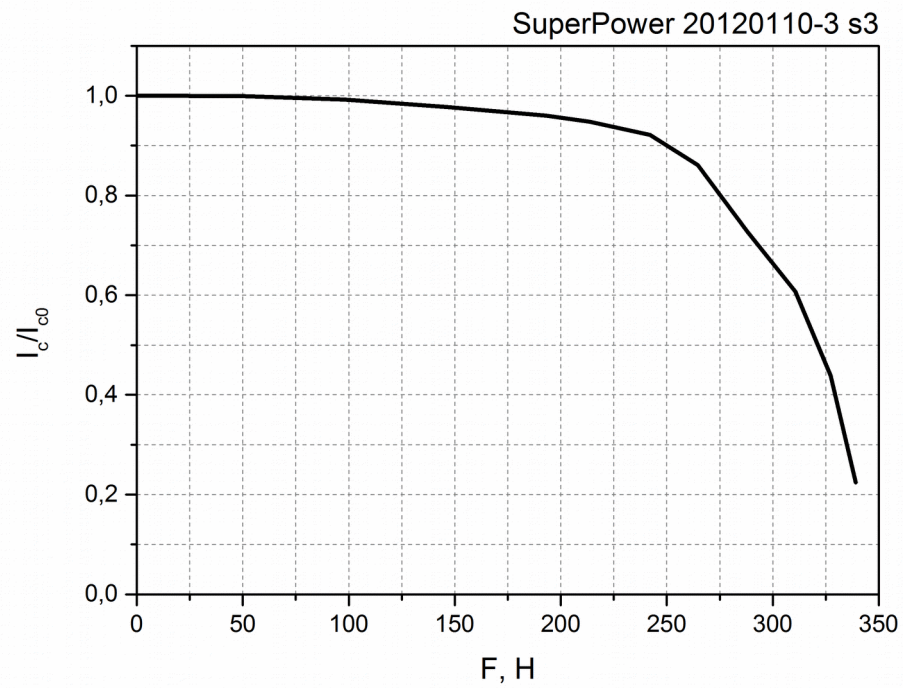


Рисунок 44. Результат испытания на растяжение ленты SuperPower

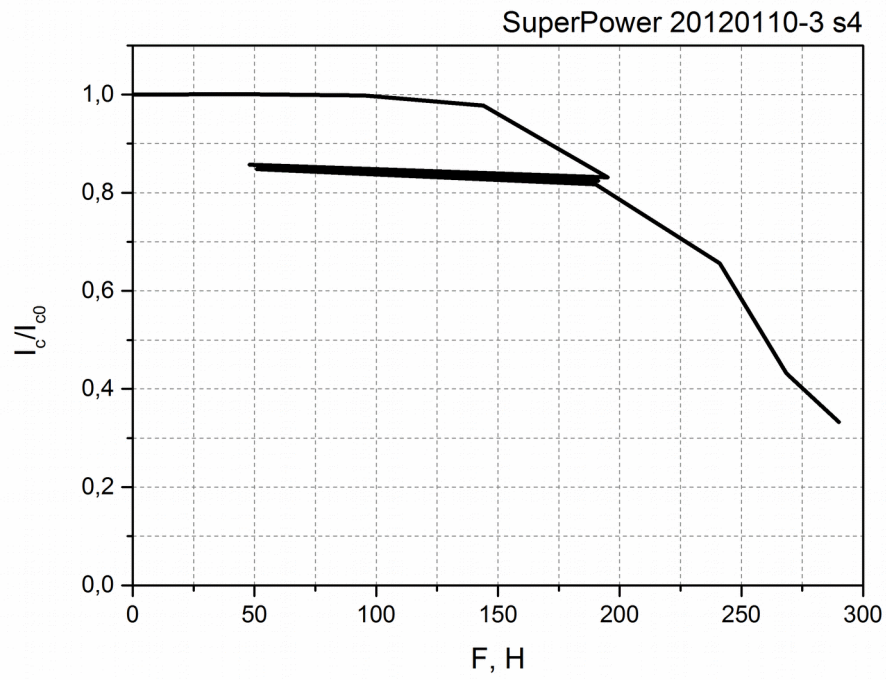


Рисунок 45. Результат испытания на растяжение ленты SuperPower

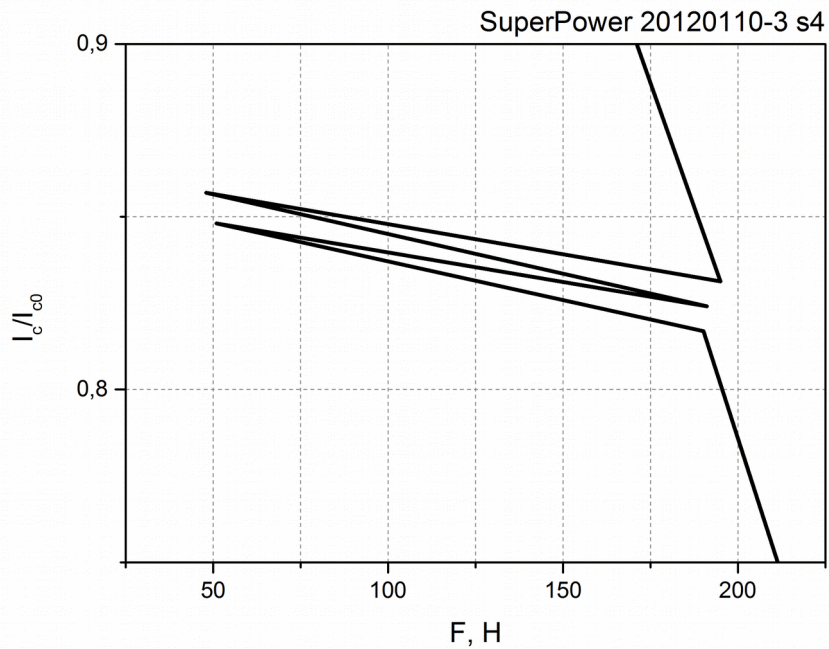


Рисунок 46. Увеличенный фрагмент графика (Рис. 45)

В эксперименте, представленном на рисунках 45 и 46, было проведено циклическое нагружение, аналогичное описанному выше. В этом случае наглядно демонстрируется необратимость процесса деградации токонесущей способности образца после достижения механической нагрузкой определенного значения.

Как видно на представленных графиках, зависимость токонесущей способности от механической нагрузки для лент AMSC и SuperPower имеет схожий характер. В обоих случаях на графиках четко виден квазилинейный участок, на котором снижение критического тока относительно невелико, после которого происходит резкое падение токонесущей способности. Численные значения для разных типов образцов ВТСП-лент отличаются. Так практически полная потеря токонесущей способности (в качестве критерия выступало снижение критического тока образца до 30% от первоначального) лентами SuperPower достигается при нагрузке в 300 – 350 Н, тогда как соответствующее значение нагрузки для лент AMSC составляет 370 – 420 Н. Потеря образцами токонесущей способности достигалась до начала пластической деформации.

Результаты, полученные при испытаниях паяных соединений ВТСП-лент SuperPower, имеют, в целом, тот же характер, что для самих лент. Однако имеются некоторые особенности. В среднем, потеря токонесущей способности спаев наступает быстрее, чем в случае отдельных лент. Снижение критического тока на квазилинейном участке ниже (приблизительно 2,5% от первоначального для спаев против 5% для лент). Резкое снижение токонесущей способности спаев характеризуется более сильной зависимостью критического тока от механической нагрузки.

Необходимо отметить, что квазилинейное снижение токонесущей способности является обратимым процессом: механическая разгрузка образца вызовет возрастание критического тока до первоначальных значений.

4.9 Анализ полученных экспериментальных результатов

Статья [62] посвящена анализу поведения ВТСП-ленты (на основе YBCO) под действием растягивающих напряжений. Авторами предложена модель, согласно которой, доменная структура ВТСП-слоя подразумевает наличие трех типов центров пининга, на которых происходит закрепление вихрей Абрикосова, обозначенных как центры вида « a », « b » и « ab » - в зависимости от расположения относительно плоскостей a и b доменной структуры.

При отсутствии внешней механической нагрузки все центры считаются эквивалентными. Максимальная сила пининга определяется выражением

$$f_p = f_{p0} \tau^S \quad (33)$$

Где $\tau = 1 - \frac{T}{T_c}$, показатель степени S принимает значения от $3/2$ до $5/2$ в зависимости от характерных размеров центра пининга.

В случае приложения механического растягивающего усилия распределение вихрей на центрах пининга изменяется. Предполагается, что для центров a и b число закрепленных на них вихрей изменится на величину $\Delta n(\varepsilon)$:

$$\begin{aligned} n_a(\varepsilon) &= n_a - \Delta n(\varepsilon) \\ n_b(\varepsilon) &= n_b + \Delta n(\varepsilon) \end{aligned} \quad (34)$$

Где n_a и n_b - число вихрей при отсутствии внешних воздействий, ε - деформация.

Изначально авторами была поставлена задача по определению $\Delta n(\varepsilon)$. В качестве начального условия было принято равновесное состояние вихрей Абрикосова находящихся под воздействием сил Лоренца, вызванных протеканием через сверхпроводник тока (при отсутствии внешних источников магнитных полей), и внешним механическим напряжением.

$$n_v^{-1} \sum_i n_i f_{pi} = f_L \quad (35)$$

Из этого условия авторами модели было получено уравнение для плотности тока:

$$\frac{J_c(\varepsilon) - J_c(0)}{J_c(0)} = \left[-\Delta n(\varepsilon) \left(\left| \frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_a} \right| + \left| \frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_b} \right| \right) + \left(n_b \left| \frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_b} \right| - n_a \left| \frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_a} \right| \right) \right] \frac{S(1-\tau)}{\tau T_c} \varepsilon \quad (36)$$

Рассмотрим его подробнее. Величины $\frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_a}$ и $\frac{\partial T_c}{\partial \varepsilon_b}$ являются постоянными относительно ε , как и величины τ и S . Критический ток сверхпроводника прямо пропорционален плотности тока. Таким образом, выражение можно переписать в виде:

$$I_c = -A\Delta n(\varepsilon)\varepsilon + B\varepsilon \quad (37)$$

где A и B – константы относительно ε . Величина критического тока определяется двумя слагаемыми: линейным и нелинейным по ε . Логично предположить, что при относительно малых деформациях основным будет линейное слагаемое, тогда как при возрастании деформации вклад нелинейной части выражения существенно увеличится. Решающим фактором в анализе данного аналитического выражения относительно опытных результатов, является то, что падение критического тока экспериментальных образцов происходило до начала пластической деформации. Это значит, что в рассматриваемой области ε прямо пропорциональна механической нагрузке. Фактически, замена ε на F в полученном выражении скажется только на значении подгоночных коэффициентов, не изменив характера зависимости. Таким образом, мы получаем аналитическое выражение для $I_c(F)$, которое, с точностью до коэффициентов, описывает полученные экспериментальные результаты.

Дополнительные сведения, подтверждающие правильность полученных в настоящей работе результатов, изложены в работе [63]. Авторами

публикации проведено исследование поведения ВТСП-лент первого и второго поколений при создании сверхпроводниковых кабелей. В частности, установлено, что при уменьшении шага намотки ВТСП-ленты на сердечник кабеля, наблюдается снижение критического тока. Причем, деградация имеет тот же характер, что и при продольном растяжении (квазилинейный участок, резкое снижение критического тока по достижении определенного значения внешней нагрузки). Отметим, что на лентах первого поколения явление куда более ярко выражено, тогда как на лентах второго поколения наблюдался лишь квазилинейный участок кривой деградации. С учетом того, что создание намотки с малым шагом требует большего натяжения провода, можно предположить, что наблюдаемая в работе [63] деградация токонесущей способности ВТСП-ленты носит ту же природу, что и описанное в настоящей работе явление.

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.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

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. Динисиллов, 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. Динисиллов, В. И. Щербаков, В. И. Тронза, «Механические испытания труб-оболочек проводника для тороидальной обмотки ИТЭР», препринт ИАЭ 6674-10, 2011.

Список использованной литературы

1. K. Natsume et. al. Experimental results of the HTS floating coil using ReBCO tapes for the Mini-RT upgrading, IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 24, № 3, 2014.
2. G. Celentano et. al. Design of an industrially feasible twisted-stack HTS cable-in-conduit conductor for fusion application, IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 24, № 3, 2014.
3. S. Ito et. al. Performance of a mechanical bridge joint for 30-kA-class high temperature superconducting conductor, IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 24, № 3, 2014.
4. D. Uglietti, R. Wesche, P. Bruzzone, Design and stress tests of a fusion cable composed of coated conductor tapes, IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 24, № 3, 2014.
5. А. Алексеев, К. Янг, Н. Митчелл, Structural Design Criteria for ITER Magnet System, тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Прочность материалов и конструкций при низких температурах», Украина, г. Киев, 25-27 мая 2010 г.. Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины. С. 1-2, 2010.
6. P. Bruzzone, K. Sedlak, B. Stepanov, High current superconductors for DEMO, Fusion Eng. Des., vol. 88, № 9-10, pp. 1564-1568
7. D. Ciazynski, Review of Nb₃Sn conductor for ITER, Fusion Engineering and Design, vol. 82, 2007, pp. 488 - 497
8. K. Seo, M. Jewell et al., Implementation of the ITER conductor database, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, vol. 20, № 3, 2010, pp. 499 – 502

9. B. Bordini, D. Bessette et al., Magnetization and inner-filament contact in HEP and ITER bronze-route Nb₃Sn wires, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, vol. 21, № 3, 2011, pp. 3373 – 3376
10. K. P. Weiss, A. Ehrlich et al., Tensile test results on compacted and annealed 316LN material, *Adv. Cryog. Eng. Mater.*, vol. 56, 2010, pp. 3 – 8
11. M. Sheth, P. Lee et al. Extended fatigue testing of strand for fusion application, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2012.
12. P. Lee, C. Sanabria et al., A metallographic study of the ITER TFEU5 CICC after testing in the SULTAN facility, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2012
13. N. Cheggour, A. Nijhuis et al. Strain and magnetic-field characterization of a bronze-route ITER wire: Benchmarking of strain measurement facilities at NIST and University of Twente, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2012
14. A. Devred et al. Status of ITER conductor development and production, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, № 3, 2012
15. V. S. Vysotsky et al., Status and achievements in production of ITER TF conductors and PF cables in Russian Cable Institute, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, № 3, 2012
16. A. V. Taran et al., New technology complex for ITER TF and PF cables and TF conductors production, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, № 3, 2010, pp. 394 – 397
17. V. E. Sytnikov et al., Development and manufacturing of superconducting cable-in-conduit conductor for ITER, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, № 2, 1997, pp. 1364 - 1367
18. Yasuhiro et al. Tensile testing device at low temperature // Патент Японии № 58-109832 от 30.06.1983
19. Toshimi et al. Very low temperature tension testing device // Патент Японии № 61-207947 от 16.09.1986

20. O.P. Anashkin, V.E. Keilin, A.V. Krivykh, et al. Mechanical tests of ATLAS Barrel Toroid tie rods, *Cryogenics*, Volume 45, Issue 7, July 2005, Pages 469-472.
21. F. Alessanria, F. Broggi, M. Todero. Mechanical characterization of the tie rods for the ATLAS B0 model coil. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 12, N.1, 2002, pp.1701-1704.
22. K. Sato, S. Kobayashi, T. Nakashima, Present status and future perspective of Bismuth-based high-temperature superconducting wires realizing application systems, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, 2012.
23. K. Hayashi, Cutting-edge technology of Bismuth-based high temperature superconducting wires for application in energy- and environment-related fields, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 50, 2011.
24. K. Sato et al., High- J_c silver-sheathed Bi-based superconducting wires, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 27, issue 2, 1991, pp. 1231 – 1238.
25. M. Wilhelm, H. -W. Neumuller, G. Reis, Fabrication and critical current densities of 2223-BiPbSrCaCuO silver sheathed tapes, *Physica C: Superconductivity*, vol. 185-189, part 4, 1991, pp. 2399 – 2400.
26. Q. Li, G. N. Reily et al., Progress in superconducting performance of rolled multifilamentary Bi-2223 HTS composite conductors, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol 7, issue 2, 1997, pp. 2026 – 2029.
27. R. Flukiger et al., Observation of the Bi, Pb(2223) reaction mechanism and alternative ways of producing tapes with new filament configurations, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 9, issue 2, 1999, pp. 2430 – 2435.
28. M. O. Rikel, A. Wolf et al., Effect of precursor phase composition on 2223 phase formation in Ag-sheathed tapes, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 15, issue 2, 2005, pp. 2499 – 2502.

29. J. W. Ekin et al., Effect of axial strain on the critical current of Ag-sheathed Bi-based superconductors in magnetic fields up to 25 T, *Appl. Phys. Letter*, vol. 61, 1992
30. M. Suenaga et al., Effects of axial tensile and bending strains on critical currents of monoand, *Appl. Phys. Letter*, vol. 62, 1995
31. R. Passerini et al., Mechanical properties of Bi, Pb (2223) single filament and $I_c(\epsilon)$ behavior in longitudinally strained tapes, *Superconductor Science and Technology*, vol. 15, № 11, 2002
32. M. Sugano, K. Osamura, M. Hojo, Mechanical properties of Bi2223 filaments extracted from multifilamentary tape evaluated by the single-fibre tensile test, *Superconductor Science and Technology*, vol. 15, № 5, 2003
33. D. M. Buczek et al., Manufacturing of HTS composite wire for a superconducting power transmission cable demonstration, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 7, issue 2, 1997
34. A. Salazar et al., Fatigue behavior of multifilamentary BSCCO 2223/Ag superconducting tapes, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 14, issue 3, 2004
35. K. Osamura et al., Mechanical behavior and strain dependence of critical current of DI-BSCCO tapes, *Superconductor Science and Technology*, vol. 21, № 5, 2008
36. H. Miao et al., Microstructure and J_c improvement in multifilamentary Bi-2212/Ag wires for high field magnet applications, *Adv. Cryo. Eng. Mat.*, vol 54, 2008, pp. 423 – 430
37. H. Miao et al., High field insert coils from Bi-2212/Ag round wires, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 17, issue 2, 2007, pp. 2262 – 2265
38. C. M. Friend et al., The development of high field magnets utilizing Bi-2212 wind and react insert coils, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 20, issue 3, 2010, pp. 583 – 586

39. W. Zhang et al., Progress in AMSC scale-up of second generation HTS wire, *Physica C* 463 – 465, 2007, pp. 505 – 509
40. M. Rupich et al., Second generation wire development at AMSC, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 23, issue 3, 2013
41. W. D. Markiewicz et al., Design of a superconducting 32 T magnet with REBCO high field coils, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol 22, 2012.
42. Y. Iwasa et al., High-temperature superconducting magnets for NM Rand MRI: R&D activities at the MIT Francis Bitter Magnet Laboratory, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol 20, 2012, pp. 718 – 721
43. J. Bascunan et al., A 13 GHz LTS/HTS NMR magnet – a progress report, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol 21, 2011, pp. 2092 – 2095
44. R. Gupta et al., Second generation HTS quadrupole for FRIB, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol 21, 2011, pp. 1888 – 1891
45. Y. Terao et al., Electromagnetic design of 10 MW class fully superconducting wind turbine generators, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol 22, 2012
46. U. P. Trociewitz et al., 35.4 T field generated using a layer-wound superconducting coil made of (RE)Ba₂Cu₃O_{7-x} (RE = rare earth) coated conductor, *Appl. Phys. Letter*, vol. 99, 2011.
47. H. Song, P. Brownsey, Y. Zhang, J. Waterman, T. Fukushima, D. Hazelton “2G HTS coil technology development at SuperPower”, *IEEE/CSC & ESAS European superconductivity news forum*, N. 22, October/November 2012
48. D. C. van der Laan, J. W. Eekin, C. C. Clickner, T. C. Stauffer “Delamination strength of YBCO coated conductors under transverse tensile stress”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 20 (2007), pp. 765-770.
49. T. Myazato, M. Hojo, M. Sugano, T. Adachi, Y. Inoue, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya “Mode I type delamination fracture toughness of YBCO coated conductor with additional Cu layer”, *Physica C* 471 (2011), pp. 1071 – 1074.

50. G. Nishijima, H. Kitaguchi “Transport and mechanical property evaluation for Cu-stabilized PLD-GaBa₂Cu₃O_y coated conductor”, IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 22, No. 3, June 2012.
51. Y. Zhang, D.W. Hazelton, A.R. Knoll, J.M. Duval, P. Brownsey et al, —Adhesive Strength Study of IBAD-MOCVD-based 2G HTS wire using a peel test, Physica C, vol. 473, pp. 41-47, 2012.
52. Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi, and H. Maeda, —Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance, Physica C, vol. 471, pp. 480-485, 2011.
53. C. A. Baldan et. al. Electrical and superconducting properties in lap joints for YBCO tapes, J Supercond. Nov. Magn., vol. 26, 2013, pp. 2089 – 2092.
54. H.S. Shin, M. J. Dedicatoria, Variation of the strain effect on the critical current due to external lamination in REBCO coated conductors, Superconductor Science and Technology, vol. 25, 2012.
55. H.S. Shin, M. Dedicatoria, A. Gorospe, J. R. Dizon, H. Oguro and S. Awaji, Strain and magnetic field response of I_c in reinforced GdBCO coated conductor tapes at 77 K, Advances in Cryogenic Engineering, AIP Conf. Proc. 1574, 2014, pp. 239 – 244.
56. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность» ГОСТ 14249-89
57. «Справочник конструктора точных приборов» И. Я. Левин, Оборонгиз, Москва 1962г.
58. «Механика материалов» С. П. Тимошенко, Дж. Гере, изд. «Мир», Москва 1976г.
59. М.П. Малков. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Государственное энергетическое издательство, Москва, 1985.

60. Р. Хэфер. Криовакуумная техника: основы применения. Москва, Энергоатомиздат, 1983.
61. J.R. Dizon, A.B. Gorospe, H.S. Shin, Numerical analysis of stress distribution in Cu-stabilized GdBCO CC tapes during anvil tests for the evaluation of transverse delamination strength, *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, 2014.
62. A. Semenov, C. Tretiatchenko, V. Svecnikov, V. Moskaliuk, V. Pan, Model of reversible strain dependencies of critical current in YBCO-based coated conductors and epitaxial PLD films, *Physics Procedia*, vol. 36, 2012, pp. 716 – 721.
63. V. E. Sytnikov, V. S. Vysotsky, I. P. Radchenko, N. V. Polyakova, 1G versus 2G – comparison from the practical standpoint for HTS power cable use, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 97, 2008.