

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

**МАГИСТРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**«СВОЙСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ  
ЛЕНТ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВНЕШНИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ»**

Выполнил студент

219 группы:

Резников Я.Г

---

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор Перов Н.С.

---

Допущена к защите

Зав. кафедрой магнетизма

д.ф.-м.н., профессор Перов Н.С.

---

Москва 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	2
1.1 ВТСП-ЛЕНТЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ.....	3
1.2 СРАВНЕНИЕ ВТСП И НТСП.....	4
1.3 ПИННИНГ МАГНИТНОГО ПОТОКА.....	6
Глава 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	7
2.1 ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	9
2.2 ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	9
2.3 УСТРОЙСТВО .....	11
2.4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	134
Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ .....	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	19
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	20
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	26

## ВВЕДЕНИЕ

С момента открытия высокотемпературных сверхпроводящих керамик в 1983г. развитие технологии производства данных материалов в виде проводников, лент, кабелей позволило использовать их для широкого класса научно-исследовательских и технических задач, таких как создание и модернизация источников сильного магнитного поля, линий передачи энергии.

Исследование технических особенностей ВТСП-материалов является актуальной задачей для расширения возможности их применения и увеличения эффективности уже существующих устройств. Особенностью данной работы является изучение ВТСП-лент 2-го поколения при механическом воздействии, производящемся непосредственно в сверхпроводящем состоянии, в отличие, от ранее представленных исследований.

Целью настоящей работы является исследование влияния деформации на критические характеристики ВТСП-лент, находящиеся в сверхпроводящем состоянии;

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- разработка методики исследования ВТСП-лент с различными параметрами производства;
- разработка и создание макета технической установки, позволяющей проводить измерение критических характеристик ВТСП-лент в сверхпроводящем состоянии.
- определение критического радиуса деформации серии лент ВТСП с различными геометрическими параметрами.

- Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

## 1.1 ВТСП-ЛЕНТЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ.

Высокотемпературные сверхпроводящие ленты 2-го поколения представляют собой ленты-провода, в которых на металлическую подложку (хастеллой, нержавеющей сталь) и специальные буферные слои наносится слой сверхпроводящей керамики на основе редкоземельного элемента (ReBCO, Re: Y, Gd, Dy и др.), нанесенной различными способами (IBAD – ионно-лучевое осаждение, ISD – осаждение на наклонную подложку, MOCVD/MOD – химическое осаждение из паров металлоорганических соединений).

В отличие от ВТСП предыдущего поколения, представляющих собой ленты, в структуре которых жилы сверхпроводника (Bi-Sr-Ca-Cu-O, BSCCO) заключены в матрицу из серебра или сплава на его основе, ленты ВТСП 2-го поколения являются более стабильными к внешним воздействиям: к магнитному полю и механической деформации[1,2]. В силу этого, а также экономической целесообразности ВТСП 2-го поколения приоритетны в широком производстве сверхпроводящих устройств.

Пример современной ВТСП ленты 2-го поколения производства компании SuperOx приведен на Рисунке 1. На этом рисунке виден 1 мкм слой гадолиниевой керамики (толщина слоя ReBCO составляет в современных лентах от 1-1,5 мкм), несколько различных буферных слоев толщиной от 7 до 50 нм, необходимых для образования правильной структуры ReBCO керамики на подложке. При различных методиках изготовления используется разное количество и толщина буферных слоев. Сама подложка, с текстурированной специальным образом поверхностью (на Рисунке 1 – 50 мкм слой хастеллоя C276), имеет в различных конструкциях ВТСП лент толщину от 30 до 100 мкм. Поверх слоя ВТСП керамики наносится 1-2 мкм слой серебра для защиты ВТСП керамики от вредного для нее влияния атмосферы и для создания

электрического контакта. Для этой же цели (контакт), а также для термодинамической и электродинамической стабилизации ВТСП ленты, наносится слой меди (обычно класса очистки М00) толщиной от 20 до 50 мкм. Слой меди может не наноситься, если нужно получить ленту с малой продольной теплопроводностью (тоководы) или с большим сопротивлением в несверхпроводящем состоянии (токоограничители). Кроме того, вместо меди или вместе с медью можно наносить латунь, сталь, другие материалы для получения нужных тепловых, электрических и механических свойств.

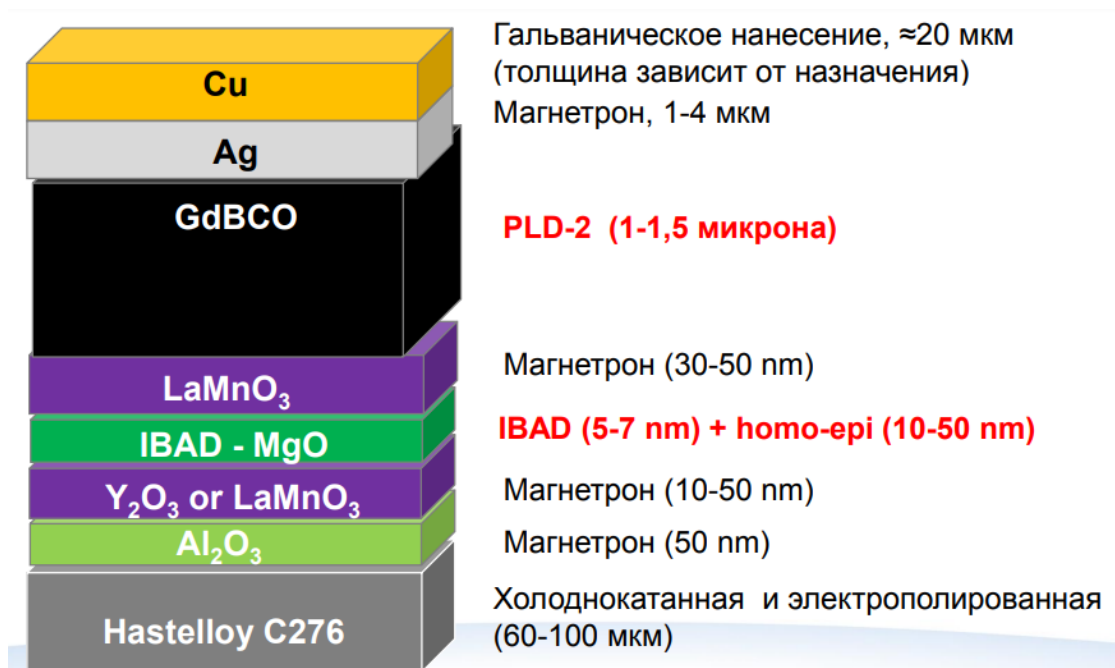


Рисунок 1 Композитная лента ВТСП 2го поколения и методы нанесения каждого слоя (SuperOx)[23]

## 1.2 СРАВНЕНИЕ ВТСП И НТСП

Основными преимуществами ВТСП лент 2-го поколения (ВТСП2П) перед НТСП является возможность получения значительно более высоких магнитных полей, более высокая термодинамическая стабильность, и во всех задачах, кроме получения высоких полей, более стабильное поддержание рабочей температуры. Зависимость критического поля ReBCO керамики от температуры приведена на Рисунке 2, видно, что максимальные магнитные

поля ВТСП-2 соленоидов будут ограничены только механическими свойствами обмоток, поскольку достаточная рабочая плотность тока может быть получена даже при температурах 20-30 К в полях 20-30 Тл. Это преимущества особенно важно для токамаков, ускорителей частиц и высокополевых лабораторных соленоидов. Термодинамическая стабильность (критическая энергия теплового возмущения) ВТСП лент 2-го поколения при всех рабочих температурах, в том числе при гелиевых температурах, объясняется высокой критической температурой  $ReBCO$ . При промежуточных температурах – от 10 К до температуры кипения жидкого азота, термодинамическая стабильность повышается на 1-3 порядка для ВТСП в сравнении с НТСП в устройствах сильных магнитных полей[4-5].

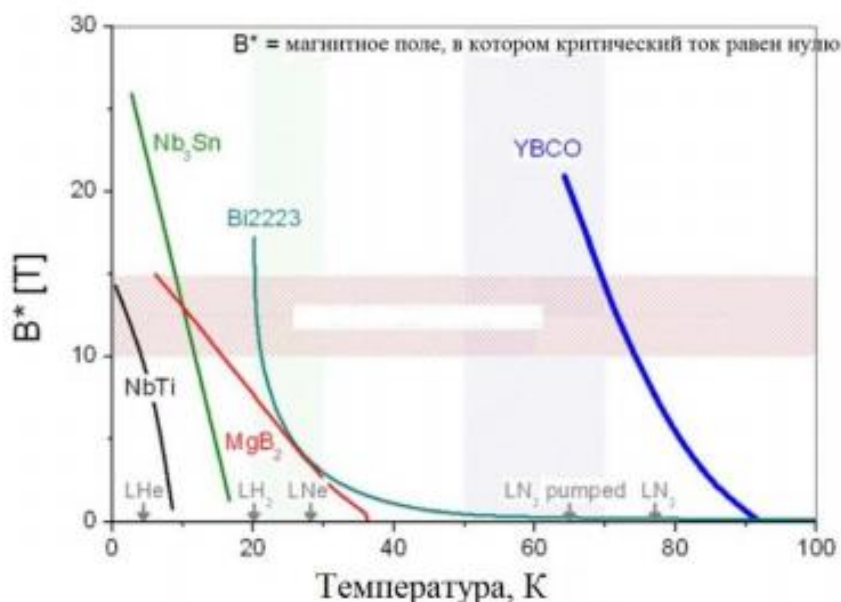


Рисунок 2 Сравнение максимальных магнитных полей различных сверхпроводников[3]

### 1.3 ПИННИНГ МАГНИТНОГО ПОТОКА

ВТСП2П являются сверхпроводниками 2-го рода, магнитное поле при достижении критического значения проникает в материал, создавая вихри Абрикосова. Магнитное поле ограничивает значение критического тока и температуры. Однако, есть подтверждения тому, что влияние магнитного поля можно уменьшить путем фиксации магнитных вихрей. Пиннинг вихрей нарушает порядок в решётке вихрей и способствует сохранению сверхпроводящей фазы даже при протекании токов большой плотности [6].

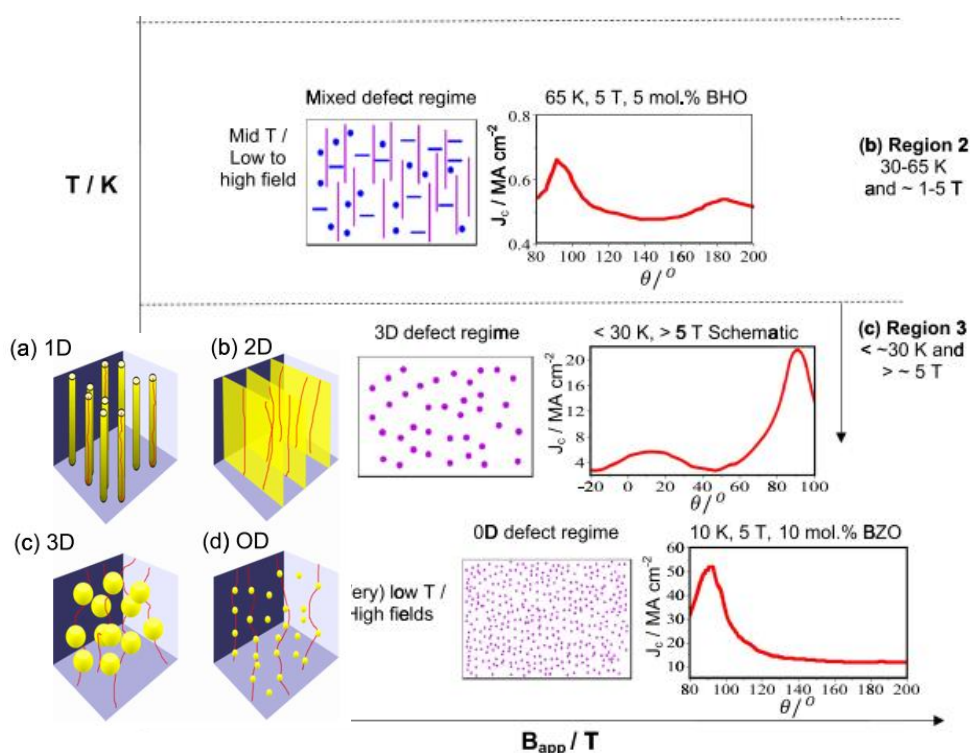


Рисунок 3 Виды центров пиннинга, их связь с критическими характеристиками ВТСП2П [7]

Центрами пиннинга могут служить как искусственно допированные в проводник элементы (перовскитные соединения:  $BaSnO_3$ ,  $BaZrO_3$  и др. [8,9]; двойные перовскиты:  $YBa_2(Nb, Ta)O_6$ ;  $Y_2BaCuO_5$  и др. [10,11]), так и внутренние дефекты, изменяющие внутренние напряжения внутри материала [12].

## 1.4 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Толщина слоя-подложки на 1-2 порядка больше толщины ВТСП-керамики, соответственно механические свойства всей ленты зависят от механических параметров подложки. ВТСП2П ассиметричен относительно плоскости ленты, в зависимости от направления изгиба относительно оси перпендикулярной к нормали и линии вдоль ленты образец испытывает деформацию растяжения или сжатия (Рисунок 4).



Рисунок 4 Деформация ВТСП: а) сжатия, б) растяжения

В силу образования микротрещин и последующих за ними разрывов ВТСП материала при деформации у материала уменьшается значение критического тока, при растяжении по достижении перкаляционного предела лента резко выходит из сверхпроводящего состояния (Рисунок 5) [16-18].

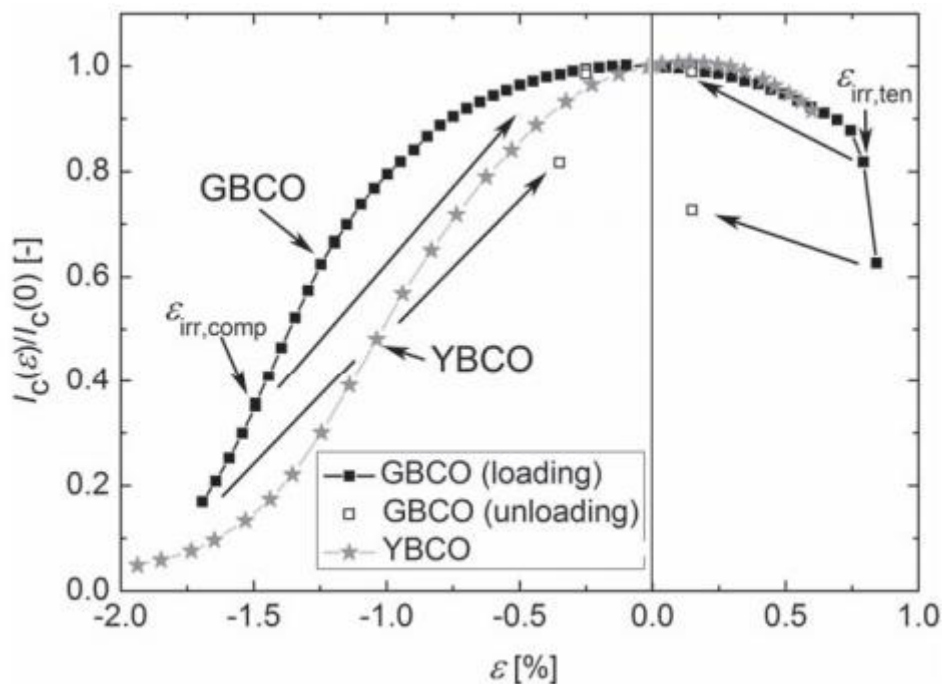


Рисунок 5 Зависимость нормированной  $I_c$  проводников с покрытием  $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (GBCO) и  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO) от деформации при  $T = 76$  К [16]



В научной литературе ранее представленные исследования влияния осевой деформации на критические характеристики ВТСП2П имели место [19-20], однако деформация происходила исключительно вне охлажденного, сверхпроводящего состояния.

С учетом вышесказанного, целью настоящей работы является исследование влияния деформации на критические характеристики ВТСП-лент, находящиеся в сверхпроводящем состоянии.

## Глава 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

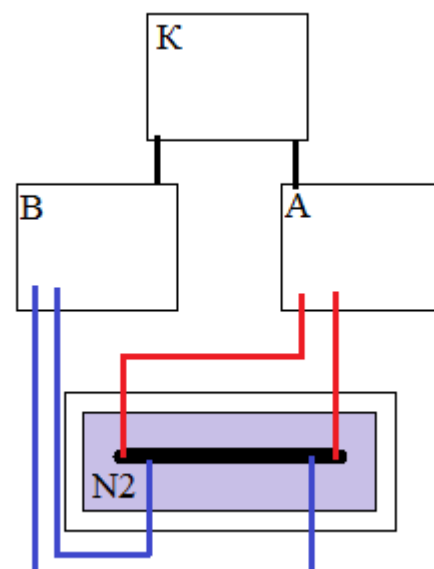
### 2.1 ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В качестве образцов для исследования использовались ленты шириной 4 и 12 мм, различной толщины подложки 30,40, 60,100 мкм на основе иттрия ( $\text{YtBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , YBCO) произведенные и предоставленные компанией SuperOx[21]. От производственных лент километровой длины намотанных на массивные бобины, отрезались участки лент метровой длины. Каждый участок разделялись на серии из пяти 20-ти сантиметровых образцов.

### 2.2 ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При достижении критического тока сверхпроводник переходит в нормальное состояние, что приводит к локальному нагреву, что в свою очередь выводит из СП состояния соседние участки материала по цепной реакции. Так лента ВТСП 2П перегревается и прожигается на участке. Однако – есть способы сохранить образец, и при этом определить критические характеристики ленты. Для этой цели часто используют четырехточечный метод (4-terminalsensing): к концам образца подключаются подводящие контакты источника тока, между ними подключены контакты вольтметра. Пошагово увеличивая ток через ленту можно определить вольт-амперную характеристику образца. Общепринятым критерием для определения критического тока в ВТСП ленте 4-точечным методом является значение напряжения  $V_{кр} = L * 1\text{мкВ/см}$ , где L - расстояние между контактами вольтметра на образце.

Схема экспериментальной установки:  
 Образец ВТСП погружен в криогенную ванну с жидким азотом (N<sub>2</sub>), к нему подсоединены контакты от источника питания GSP10-1000 (А, красные) и вольтметра SMU 2600В (В, синие). Данные ВАХ передаются в компьютер для последующей обработки в программе.



На Рисунке 6 представлен вид рабочей программы (Приложение 2), используемой для проведения текущего эксперимента. Программа написана на языке Python 3, в ней можно: задать ограничение тока на источнике, шаг увеличения тока, критерий напряжения  $V_{кр}$ , так же в программе строится визуальное представление графика ВАХ  $U(I)$  с соответствующей экспоненциальной аппроксимацией. На выходе полученные данные ВАХ, значения критического тока  $I_c$  и показателя степени ВАХ  $n$ , записываются в файл.

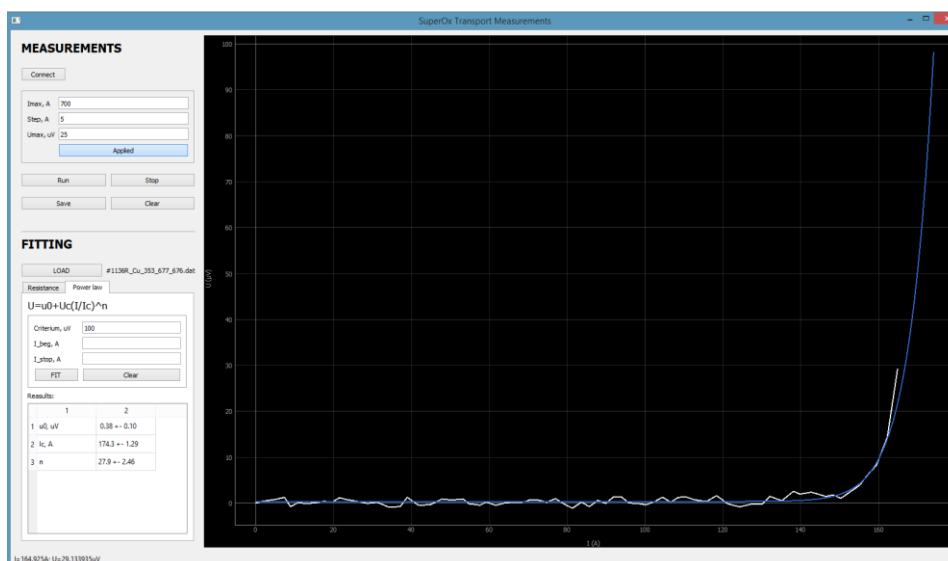


Рисунок 6 Построение ВАХ участка ВТСП ленты (интерфейс программы).

## 2.3 УСТРОЙСТВО

Автор настоящего исследования в рамках бакалаврской дипломной работы уже производил попытки изучения влияния деформации на ВТСП2П (GdBCO, THEVA)[22]. В настоящей работе были исправлены ошибки допущенные ранее, сделаны корректировки в методике и техническом оборудовании эксперимента.

Для проведения исследования была создана криогенная-азотная вставка (см. Приложение 1).

Основной идеей эксперимента является совершение механической деформации ВТСП ленты в сверхпроводящем состоянии.

Для этой цели необходимо вывести управляющий элемент вне хладагента, при этом изучаемый образец должен быть охлажден, как и подводящие кабели источника питания, подсоединенные к образцу. Подвижная часть криогенной установки состоит из кареток движения, двух шпилек разного направления резьбы. Шпильки соединены между собой соосно, каждая связана с соответствующими каретками движения гайками так, что при вращении шпилек, гайки двигаются вдоль оси шпилек по направлению друг к другу, толкая за собой каретки движения.

Профили каркаса подвешены вертикально так, чтобы при поднятии азотной ванны образец, держатели и подводящие контакты полностью были погружены в жидкий азот.

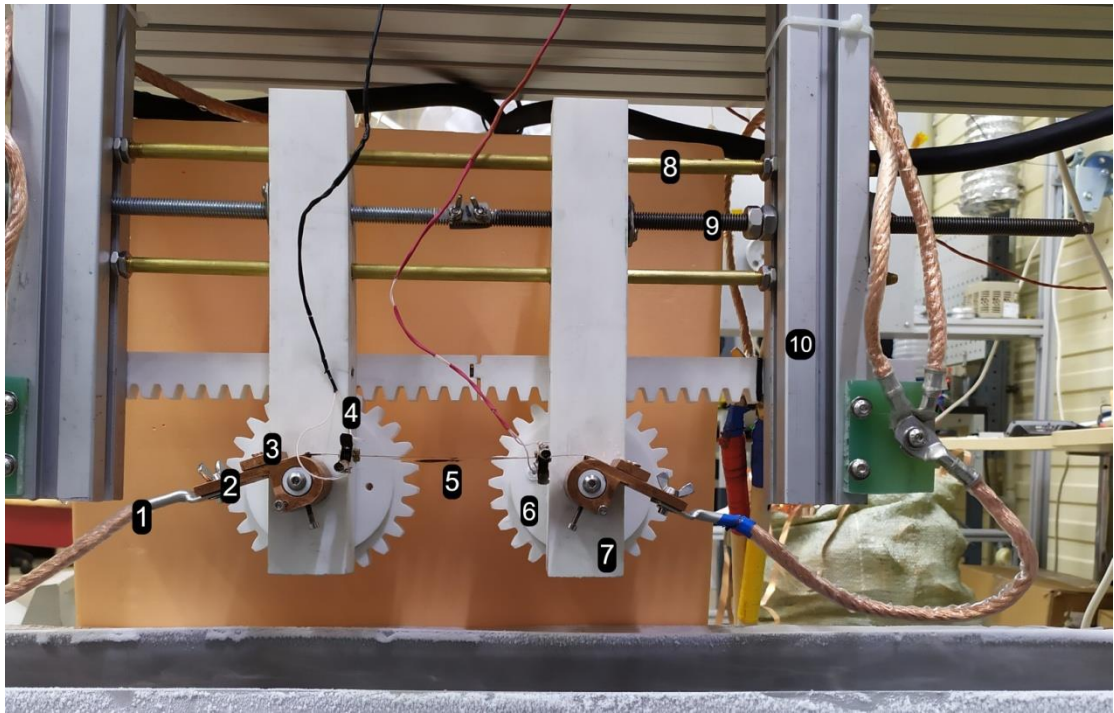


Рисунок 7 Конструкция криогенной вставки: 1 – кабели источника питания, 2 – медные держатели, 3 – прижимные пластины медных держателей, 4 – контакты напряжения, 5 – Лента ВТСП, 6 – валы вращения, 7 – каретки движения, 8 – направляющие, 9 – скрепленные шпильки разного направления резьбы, 10 – каркас криогенной вставки.

Текущая версия установки позволяет совершать изгиб ВТСП-ленты в 3 режимах:

1. Держатели соединены с валами вращения, которые связаны с реечной передачей шестереночными зубцами. При сближении кареток движения, валы-шестеренки вращаются, изгибая ленту. Таким образом, существует прямая связь угла между концами ленты - расстоянием между держателем – количеством оборотов шпильки вращения.
2. Держатели свободно подвешены на валах-шестеренках, а значит лента поддерживает шестеренки собственной упругостью.
3. Держатели жестко зафиксированы на каретках движения. При сближении кареток образец изгибается в 3х местах («сжимается» на

держателях, диаметр изгиба  $D=25\text{мм}$ , «растягивается» в середине образца, см. Рисунок 8).

В ходе настоящей работы было подтверждено, что ленты ВТСП не изменяют критических характеристик при изгибе под собственным весом, поэтому было принято решение добавить в конструкцию груз с цилиндрами различного диаметра на конце, который свободно опирался бы на середину образца (см. Рисунок 2). При этом груз не должен создавать внутренние напряжения в ленте, влияющие на сверхпроводящие характеристики образца.

Самым эффективным режимом измерения является  $3\Omega$ , в котором держатели зафиксированы на каретках движения, т.к.

создавать воспроизводимый эксперимент с деформацией малого радиуса изгиба, меньше 10 мм.

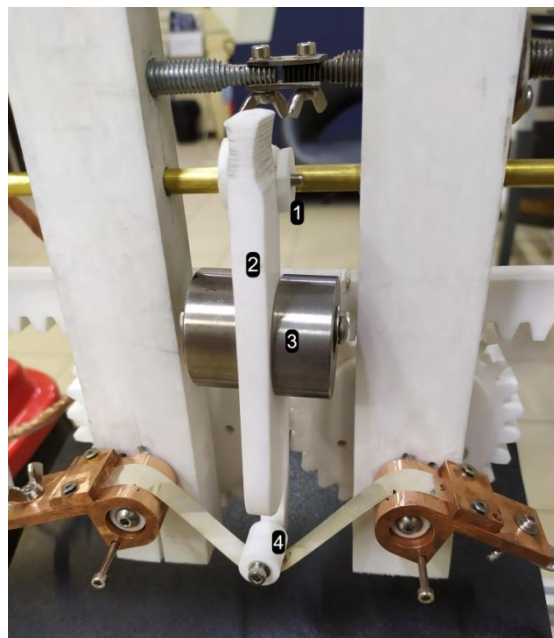


Рисунок 8 Груз: 1 - фиксатор придерживает груз в вертикальном положении, 2 - фторопластовый каркас груза, 3 - утяжелители, 4 - цилиндрический наконечник.

## 2.4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образец ленты фиксируется прижимными пластинами на держателях, к ленте подключаются контакты вольтметра (расстояние 10 см для образца длиной 20 см).

Установка погружается в жидкий азот ( $T= 77,4\text{K}$ ). Далее поэтапно проводятся измерения ВАХ недеформированного образца, деформированного сближением держателей без груза и с грузом с различными диаметрами



Рисунок 9 Демонстрация изгиба ленты ВТСП цилиндрами различного радиуса на конце груза.

цилиндров на конце (25,22,18,16,14,12,10,9,8,7,6,5,4,3 мм).

Лента ВТСП несимметрична относительно подложки, поэтому возможны два варианта изгиба ленты, при которых ВТСП-материал сжимается или растягивается. При этом известно, что при сжатии критические свойства падают при меньших радиусах изгиба, поэтому исследование на изгиб при растяжении образца представляет бóльший интерес.

В данной методике ленты ВТСП изгибаются трижды: на держателях лента сжимается (радиус изгиба 12,5 мм), а в центре – растягивается цилиндрами различного диаметра.

Радиус изгиба 12,5 мм не влияет на критические характеристики ВТСП лента в любом направлении деформации, поэтому единственно важной является деформация грузом.

Груз весом 430г служит для натяжения ленты ( сила натяжения ленты соответствует  $F=6\text{H}$ ), при этом не меняет критического тока ленты( см. Результаты), а значит единственным источником деформации служит изгибающий цилиндр на конце груза.

### Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования были проведены измерения критического тока образцов лент ВТСП (С-Инновации, YBCO) шириной 4 и 12 мм длиной 20 см, толщина подложки 30,40, 60 мкм. Были получены следующие результаты:

1. Каждый образец изучался в недеформированном состоянии до сближения держателей, после сближения и с грузом с пошаговым уменьшением диаметра изгибающего цилиндра от 25 мм до 3 мм. Сближение держателей и установка груза 430г в серии измерений не привели к изменению критического тока ленты выше погрешности в  $\pm 2\text{A}$  (Таблица 1). Данный факт свидетельствует о том, что образец деформируется именно в месте изгиба, а груз служит лишь для натяжения ленты (сила натяжения в данной методике  $F = 6\text{H}$ ).

Таблица 1

Номер ленты №	Крит. Ток до сближения, А	Крит. Ток после сближения, А	Крит. Ток с ленты с грузом(d =25мм), А
#769L(4)	169	168	168
#769C(1)	187	188	187
#739(2)	502	501	501
#921(3)	427	425	427
#853(2)	298	299	296



2. Деформация образца является неупругой, значение критического тока после изъятия груза не восстанавливается.

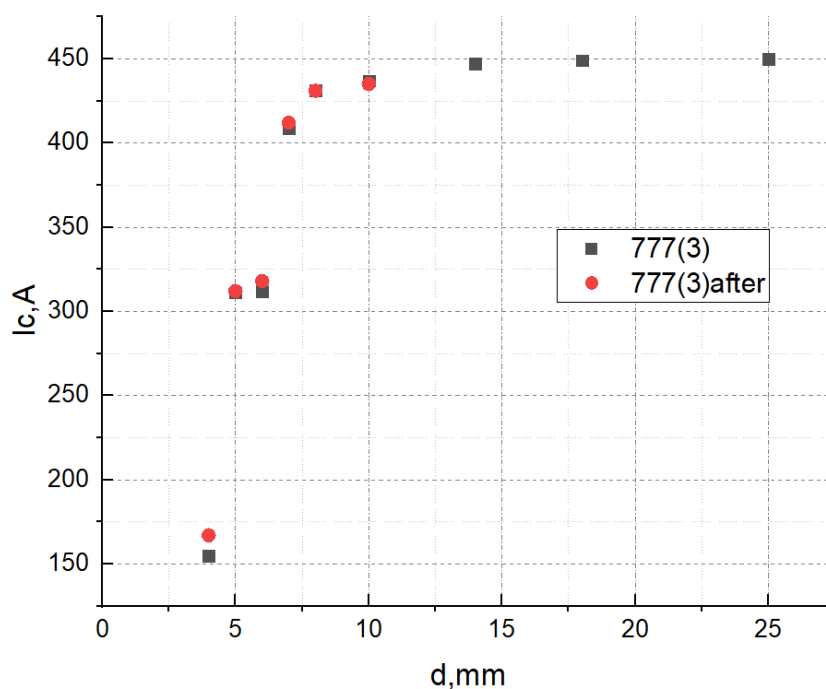


Рисунок 10 График зависимости критического тока от диаметра деформации ВТСП-ленты во время (черные точки) и после измерения с грузом (красные точки). Критический радиус изгиба определяется падением критического тока на 10% от максимального значения (в недеформированном состоянии).

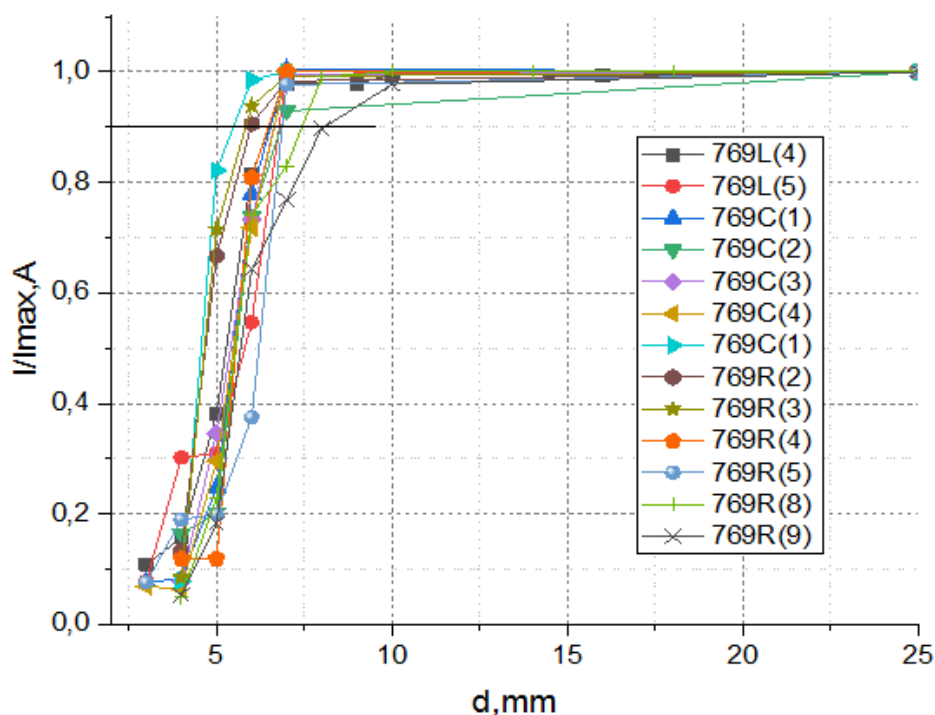


Рисунок 11 График зависимости критического тока от диаметра изгиба для серии лент, толщина подложки которых 30 мкм (ширина 4 мм).

Образцы, подложка которых имела толщину  $t = 100$  мкм, продемонстрировали стабильность при воздействии груза. И хотя уменьшение критического тока было зафиксировано, но достоверно говорить о критическом радиусе изгиба, при котором критический ток падает на 10%, не удастся. Примерная оценка такого радиуса:  $R = 2,04$  мм, что меньше, чем у лент с более тонкой подложкой. Данный факт объясняется скорее тем, что лента не была достаточно деформирована в силу большей упругости и ограничений эксперимента, а значит, полученное значение критического радиуса изгиба не соответствует реальному и включать в статистику его не стоит.

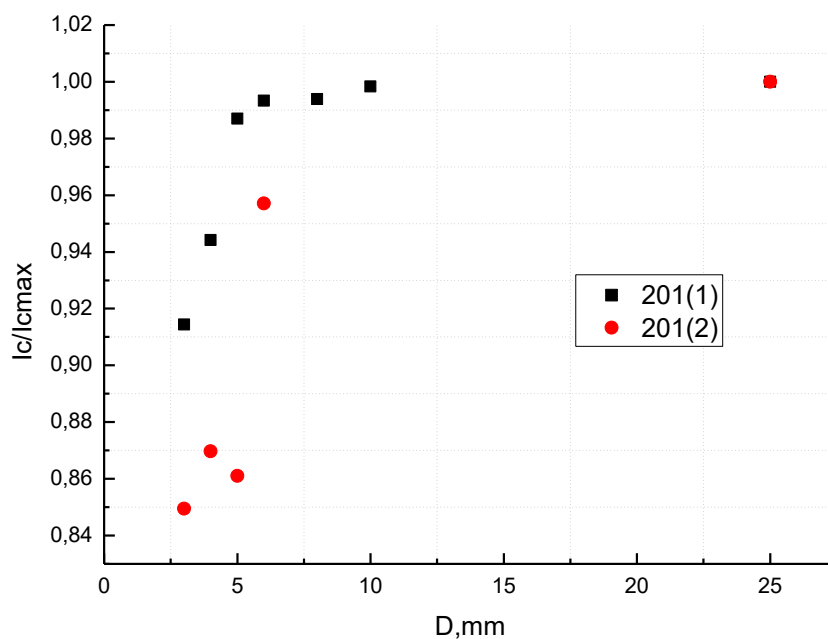
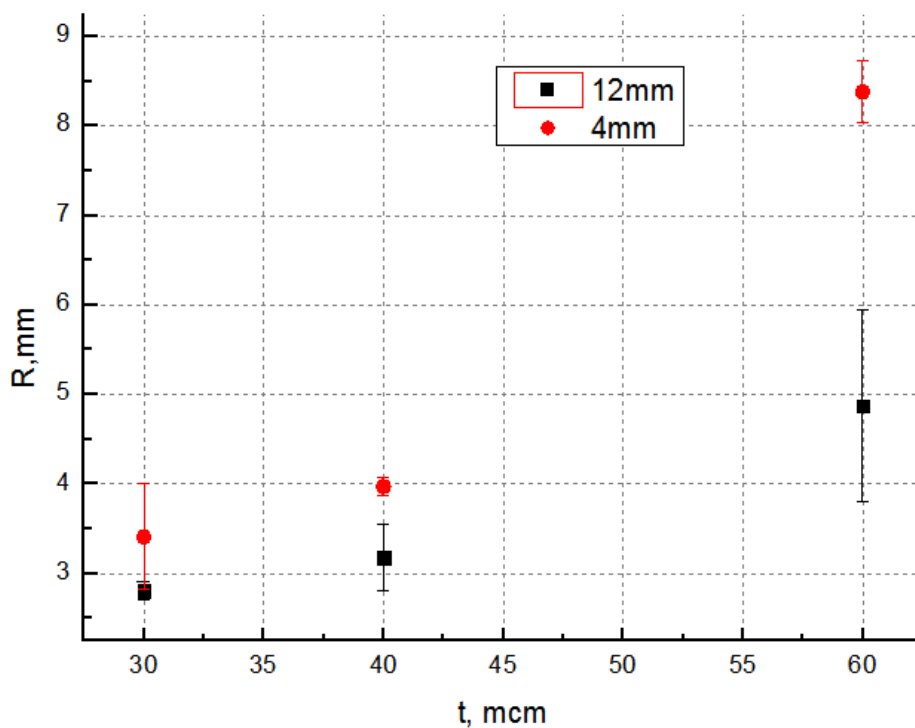


Рисунок 12 График зависимости критического тока от диаметра изгиба для серии лент, подложка 100 мкм, ширина 12мм.

Толщина подложки, мкм	Ширина ленты, мм	Критический радиус $R(I_c:90\%)$ , мм
30	4	$3,41 \pm 0,59$
30	12	$2,81 \pm 0,10$
40	12	$3,18 \pm 0,37$
60	12	$4,87 \pm 1,07$
100	12	--

Рисунок 13 Зависимость критического радиуса изгиба лент ВТСП от толщины подложки, с указанием статистической погрешности.



Критический радиус изгиба лент ВТСП убывает с уменьшением толщины подложки ленты (Рисунок 13).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работы была создана методика и разработано техническое оборудование для проведения исследования влияния деформации изгиба лент ВТСП2П на критические характеристики в сверхпроводящем состоянии. Был определен критический радиус изгиба ВТСП-лент различной ширины (4 и 12 мм) и толщины подложки (30,40,60 мкм) в сверхпроводящем состоянии.

Основные результаты:

- Значение критического тока не восстанавливается после деформации изгиба.
- Критический радиус изгиба ( $0.9 I_{сmax}$ ) для серии лент шириной 4 мм выше, чем для лент шириной 12 мм.
- Критический радиус изгиба лент ВТСП убывает с уменьшением толщины подложки ленты.
- Среднее значение критического радиуса изгиба  $R_c = 3,55 \pm 1,25$  мм.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] A.P. Malozemoff et al. / *Physica C* 386 (2003) 424–430
- [2] A. Nilson, BSCCO superconductors processed by the glass-ceramic route (2009)
- [3] C. Kessel et al., The Fusion Nuclear Science Facility, the critical step in the pathway to fusion energy, *Fusion Sci. Tech.*, 68, 225 (2015).
- [4] J.E. Menard et al, Fusion nuclear science facilities and pilot plants based on the spherical tokamak, *Nuclear Fusion*, 56, 106023, (2016).
- [5] A. Garofalo, V. Chan, R. Stambaugh, J. Smith, C. Wong, Mission and overview of a Fusion Development Facility, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 30, 461 (2010).
- [6] Foltyn S R et al 2007 Materials science challenges for high- temperature superconducting wire *Nat. Mater.* 6 642
- [7] J P F Feighan et al. “Materials design for artificial pinning centres in superconductor PLD coated conductors” *SUPERCOND. SCI. TECHNOL.* 30 (2017) 123001
- [8] Maiorov B, Baily S A, Zhou H, Ugurlu O, Kennison J A, Dowden P C, Holesinger T G, Foltyn S R and Civale L 2009 Synergetic combination of different types of defect to optimize pinning landscape using BaZrO<sub>3</sub>-doped YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> *Nat. Mater.* 8 398–404
- [9] Wee S H, Zuev Y L, Cantoni C and Goyal A 2013 Engineering nanocolumnar defect configurations for optimized vortex pinning in high temperature superconducting nanocomposite wires *Sci. Rep.* 3 2310
- [10] Matsumoto K and Mele P 2010 Artificial pinning center technology to enhance vortex pinning in YBCO coated conductors *Supercond. Sci. Technol.* 23 014001
- [11] Obradors X, Puig T, Ricart S, Coll M, Gazquez J, Palau A and Granados X 2012 Growth, nanostructure and vortex pinning in superconducting YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin films based on trifluoroacetate solutions *Supercond. Sci. Technol.* 25 123001
- [12] Obradors X, Puig T, Gibert M, Queralto A, Zabaleta J and Mestresa N 2014 Chemical solution route to self-assembled epitaxial oxide nanostructures *Chem. Soc. Rev.* 43 2200

- [13] Elena I. Suvorova et al. "Energy dependent structure of Xe ion tracks in YBCO and the effect on the superconductive properties in magnetic fields" J. APPL. PHYS. 126, 145106 (2019)
- [14] G Tiana et al. "Cu-doping induced ferromagnetic insulating behavior and domain wall pinning effects in LaMnO<sub>3</sub>" RARE METALS, Vol. 30, No. 4, Aug 2011
- [15] C Barth et al. "Electro-mechanical properties of REBCO coated conductors from various industrial manufacturers at 77K, self-field and 4.2K, 19T" SUPERCOND. SCI. TECHNOL. 28 (2015) 045011
- [16] van der Laan D C, Lu X F and Goodrich L F Compact GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> coated superconductor cables for electric power transmission and magnet applications Supercond. Sci. Technol. (2011) 24 042001
- [17] N V Bykovsky et al 2014 J. Phys.: Conf. Ser. **507** 022001
- [18] B.G Lazarev et al./Physica C 235-240 (1994) 1213-1214
- [19] D.Korzekwa et al. Applied Superconductivity (1994) Vol. 2, No. 314, p. 261
- [20] V Bobrov Deformation, structure and properties of ceramics and crystals of high- $T_c$  superconductors (1993) Fundamental Aspects of Dislocation Interactions, Pages 146-152
- [21] [superox.ru](http://superox.ru) – сайт компании производителя ВТСП2П в России.
- [22] [http://magn.phys.msu.ru/diploma/2019/2019\\_rezников\\_bak.pdf](http://magn.phys.msu.ru/diploma/2019/2019_rezников_bak.pdf) - бакалаврская работа автора.
- [23] А.Р.Кауль et al. Токонесущие ленты второго поколения на основе ВТСП ЛКИ 2009

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Перову Н.С., за всестороннюю помощь и поддержку как во время выполнения выпускной работы, так и за всё время обучения на кафедре. Благодарю Дегтяренко П.Н. и Узких Р.В. за руководство и поддержку в процессе исследовательской работы, а также организацию С-Инновации за предоставленные образцы и возможность изучать материал на техническом оборудовании предприятия. Благодарю всех сотрудников кафедры магнетизма за их профессионализм, понимание и неравнодушное отношение к студентам.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### СОЗДАНИЕ КРИОГЕННОЙ ВСТАВКИ.

В рамках работы по созданию криогенной вставки, позволяющей проводить исследования влияния упругих деформаций изгиба образца, находящегося в сверхпроводящем состоянии, были выполнены следующие действия:

Разработано несколько концепций криогенной вставки для изгиба лент ВТСП2П в сверхпроводящем состоянии. Конечный вариант концепции установки удовлетворяет принципу простоты использования и включает лишь механические системы регулирования и согласования элементов;

Рассчитаны линейные размеры деталей установки;

– Создана 3D-модель установки в программе «КОМПАС-3D»(см. Рисунок 3);

– Определены функциональные материалы, удовлетворяющие требованиям установки;

– Опытные испытания материалов в криогенной среде. В результате испытаний материал ABS-пластик был заменен на более прочный полилактит;

– Изготовлены и/или подготовлены к использованию детали:

a) Держатели Сгибающие, 2шт (медь);

b) Прижимные Пластины, 2шт (медь)

c) Вращающиеся Вал, 2шт (полилактит, изготовлено на 3D-принтере);

d) Направляющая Рейка (полилактит, изготовлено на 3D-принтере);

e) Каретки Движения, 2шт (полилактит, изготовлено на 3D-принтере);

f) Каркас (алюминиевый профиль)



- g) Правая шпилька (сталь, закуплена)
- h) Левая шпилька (сталь, нарезалась вручную)
- Осуществлена сборка установки;
- Проведены тестовые испытания на изгиб ленты ВТСП при комнатной температуре; благодаря испытаниям выявлены недостатки криогенной вставки, которые не могли быть обнаружены на стадии разработки (см. Рисунок 3);
- Отладка криогенной вставки на предмет устойчивости и согласования подвижных частей конструкции;

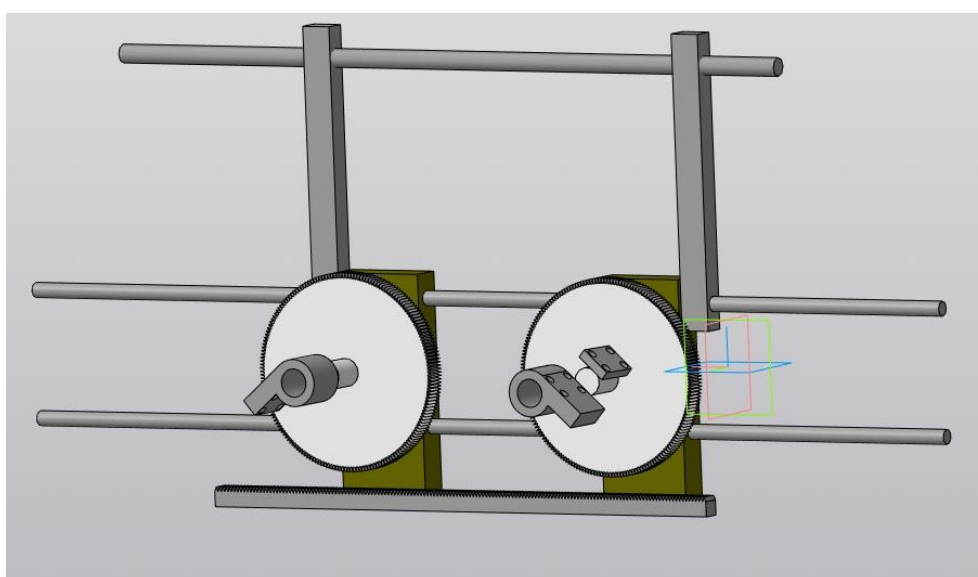


Рисунок14 Создание 3D-модели в программе "Компас-3D"



Рисунок 15

Испытания установки в условиях комнатной температуры

- В результате испытаний была обнаружена изначальная ошибка методики: изгиб ленты не приводил к изменениям критических характеристик ленты, т.к. не были достигнуты значение критического радиуса изгиба.

Было принято решение видоизменить методику:

- Держатели зафиксированы на каретках движения и не вращались на полилактитных валах.

- Создан набор цилиндров различных диаметров ( 25, 22, 18, 16, 14, 12, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3) – Рисунок 4.

- Цилиндры из фторопласта зафиксированы на болтах М4 и М3, которые вкручиваются в фторопластовый стержень. Один конец стержня устанавливается на середине ленты, другой выступает над поверхностью жидкого азота и придерживается фиксатором вертикально, так что весь вес стержня и утяжелителей на стержне приходится на середину ленты.



Рисунок 16 Внешний вид набора цилиндрических наконечников для изгиба ВТСП ленты

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ВАХ и критический ток определялись при помощи программы ,  
выполненной на языке программирования Python:

1/ Элемент программы : построение массива экспериментальных данных  
ВАХ.

```
try:
    self.fit = np.polyfit(i[ib:ie], u[ib:ie], 1)
    # print(fit)
    R = self.fit[0]
    R *= 1000 # mOhm
    if abs(R) > 1000:
        R /= 1000
        self.fitting_wid.lineR.setText("R, Ohm")
    elif abs(R) < 1 and R > 0.001:
        R *= 1000
        self.fitting_wid.lineR.setText("R, uOhm")
    elif abs(R) < 0.001:
        R *= 1000000
        self.fitting_wid.lineR.setText("R, nOhm")
    # insert data to brackets
    self.fitting_wid.lineRR.setText(str(round(R, 2)))

    i2 = np.array([i[ib]*0.9, i[ie]*1.1])
    dr = i2 * self.fit[0] + self.fit[1]
    self.graph.draw(2, i2, dr)
    self.graph.canv_draw()
    self.fitted[voltindex] = True
    self.fitting_wid.butSlope.setEnabled(True)
```

2/ Элемент программы : экспоненциальная аппроксимация массива данных  
ВАХ.

```
try:
    popt, pcov = curve_fit(ic_power, i[ib:ie], u[ib:ie], p0=[u[ib + 1], i[ie], 20]) #
    print('posle', popt)
    perr = np.sqrt(np.diag(pcov))
    print('err', perr)
    # print(fit)
    # popt[0] *= 1000000 # back to uV
    # perr[0] *= 1000000
    self.fitting_wid.lineIc_A_num.setText(str(round(popt[1], 2)) + ' +- ' + str(round(perr[1], 2)))
    self.fitting_wid.line_n_num.setText(str(round(popt[2], 1)) + ' +- ' + str(round(perr[2], 1)))
    self.fitting_wid.line_u0_num.setText(str(round(popt[0]*1000000, 2)) + ' +- ' + str(round(perr[0]*1000000, 2)))

    ifit = np.arange(start=0,
                    stop=popt[1] * ((float(self.fitting_wid.lCrit.text()) - popt[0]) /
                                   float(self.fitting_wid.lCrit.text())) ** (1 / popt[2]), step=0.2)
    self.graph.draw(2, ifit, ic_power(ifit, *popt))
    self.graph.canv_draw()
    # curve2.setData(ifit, ic_power(ifit, *popt))
    self.in_data.set_parameter(9, self.fitting_wid.lCrit.text())
    self.fitted[voltindex] = True
except:
    print("Unexpected error:", sys.exc_info())
```