



РОСАТОМ ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 для ЭМС установок УТС нового поколения

Открытый научный семинар
«Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии»

Докладчик И.Ю. Родин, АО «НИИЭФА»

Москва, февраль 2022 г.

Данная презентация подготовлена при поддержке и прямом участии замечательных специалистов, которым докладчик хотел бы выразить свою глубочайшую признательность:

Запретиной Елене Руслановне, АО «НИИЭФА»

Зернову Сергею Михайловичу, АО «ТВЭЛ»

Красильникову Анатолию Витальевичу, ЧУ «ИТЭР-Центр»

Панцырному Виктору Ивановичу, ООО «Русатом МеталлТех» (РМТ);

Сытникову Виктору Евгеньевичу, АО «НТЦ «ФСК ЕЭС»

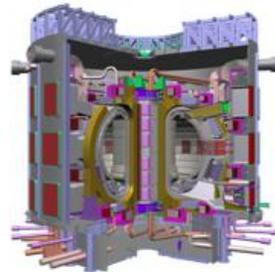
Юдину Александру Михайловичу, АО «НИИЭФА»

✓ Почему ТРТ:

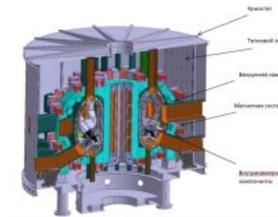
- интеграция в единой установке ключевых инновационных термоядерных технологий;
- квазистационарные плазменные разряды >100 с;
- развитие российских технологий УТС – от ИТЭР и Т-15МД к ТРТ.



Т-15МД
физ. пуск в 2021 г.



ИТЭР
физ. пуск в 2025 г.



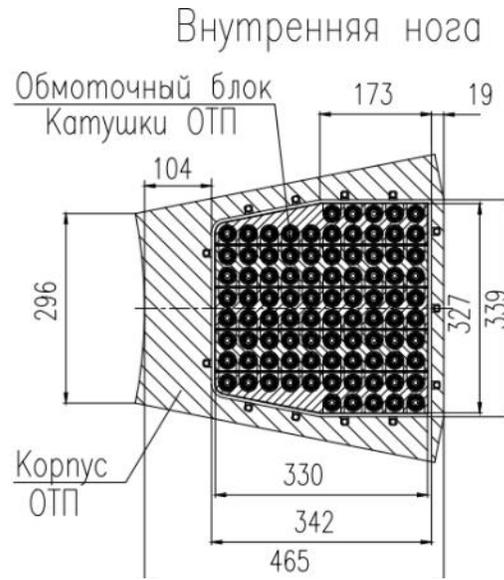
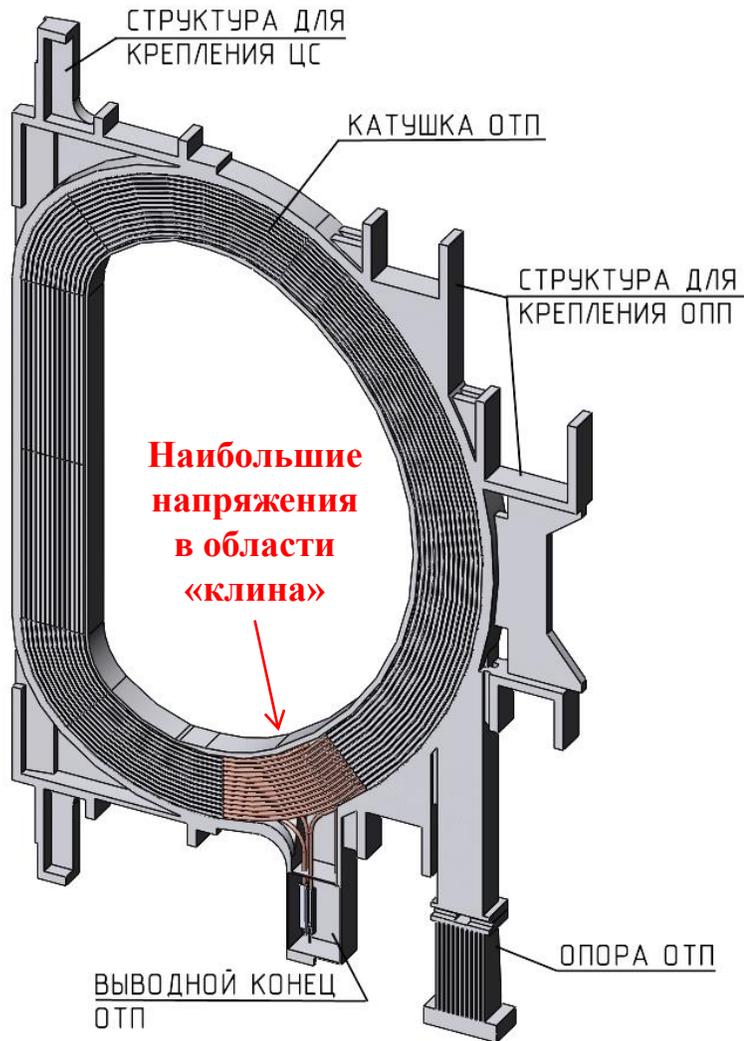
ТРТ
физ. пуск в 2032 г.

✓ Почему обмотки из ВТСП-2:

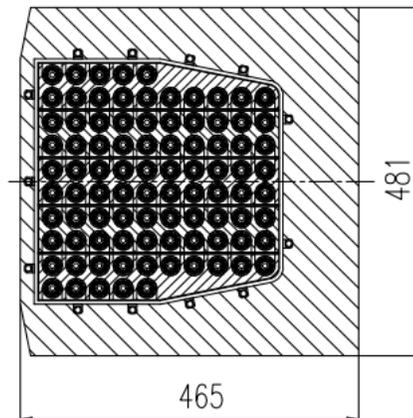
- конструктивная плотность тока обмоток до 80 А/мм² в магнитном поле до 18 Тл;
- невозможность использования традиционных НТСП;
- накопленный опыт изготовления ВТСП-2 лент и токонесущих элементов на их основе.

✓ Первоочередные задачи:

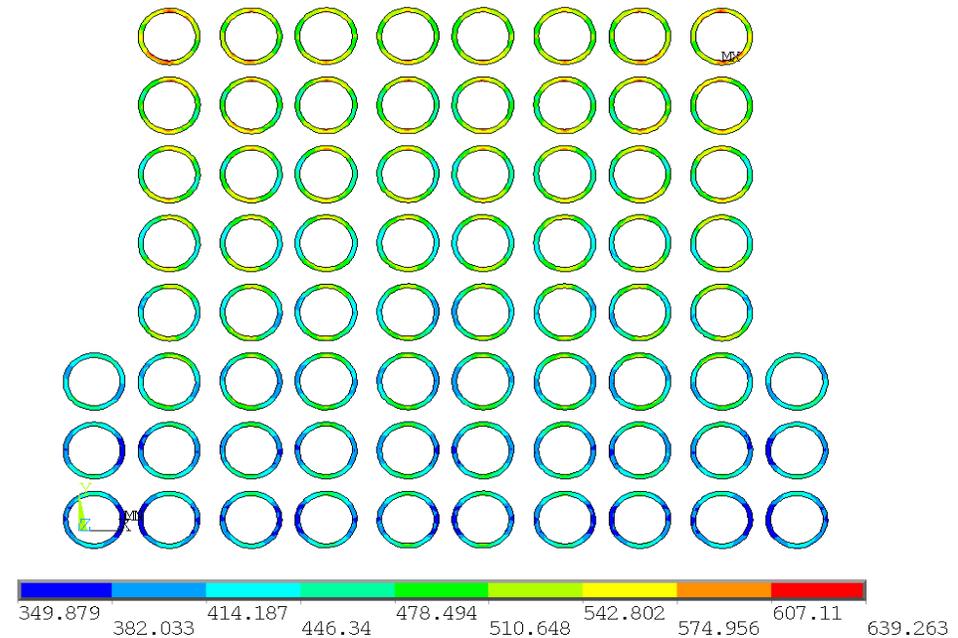
- создание и подтверждение характеристик обмоточных ВТСП-2 проводов;
- разработка и реализация верификационной программы модельных катушек обмоток ТРТ.



Наружная нога

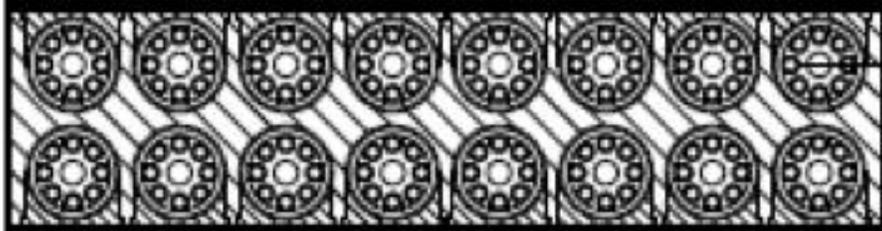


Оценка прочности ОТП ЭМС (Срыв тока плазмы)



Интенсивность напряжений (МПа)

Основной вклад – сжимающие напряжения в арочном распоре



Плотность тока в ОТП такова, что без радиальных пластин в проводах, находящихся ближе к оси, механические напряжения существенно превышают допустимые величины. Секционирование обмотки, как альтернатива, не обеспечивает требуемую прочность.

Оценка статической прочности ОТП при действии ЭМ сил

	Категория напряжений	Расчётное напряжение, МПа	Допускаемое напряжение, МПа	Коэффициент запаса
AISI 316LN ковкая/03X20H16AG6				
Корпус КТП	σ_m	827	533/800	0.82/1.24
	σ_{m+b}	971	800/1200	
AISI 316LN ковкая/03X20H16AG6				
Рад. пластины	σ_m	702	533/800	0.76/1.14¹⁾
	σ_{m+b}	723	693 ²⁾ /1040 ¹⁾	
AISI 316LN экструдированная/03X20H16AG6				
Кожух СП	σ_m	596	667/800	1.12/1.34
	σ_{m+b}	635	867/1040 ¹⁾	

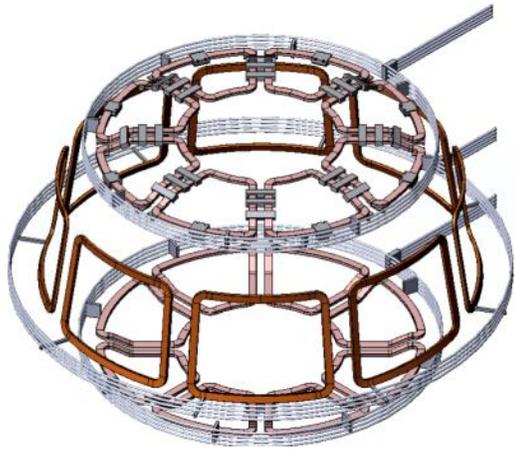
Расчеты выполнены для варианта использования радиальных пластин.

Оценка прочности дана для сталей примененных в ИТЭР, а также для более прочной отечественной стали 03X20H16AG6.

При сохранении существующих параметров ЭМС ТРТ применение стали 03X20H16AG6 становится безальтернативным.

1) Для элементов конструкции на которые нанесена высоковольтная изоляция

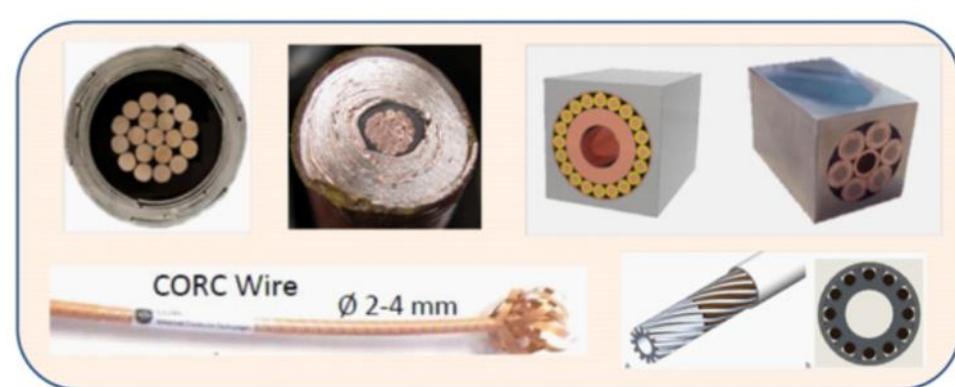
Ключевой вопрос создания обмоточных проводов ТРТ – достижение требуемой конструктивной плотности тока при заданных рабочих характеристиках (B , T , σ ,...).

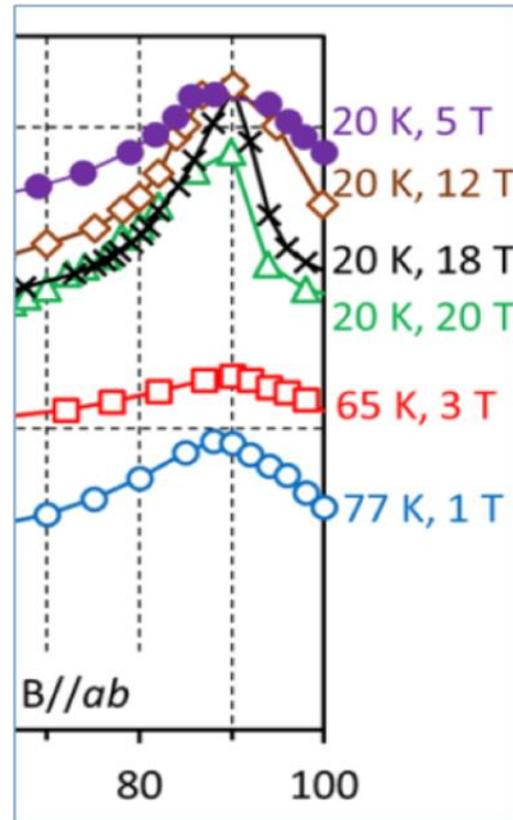
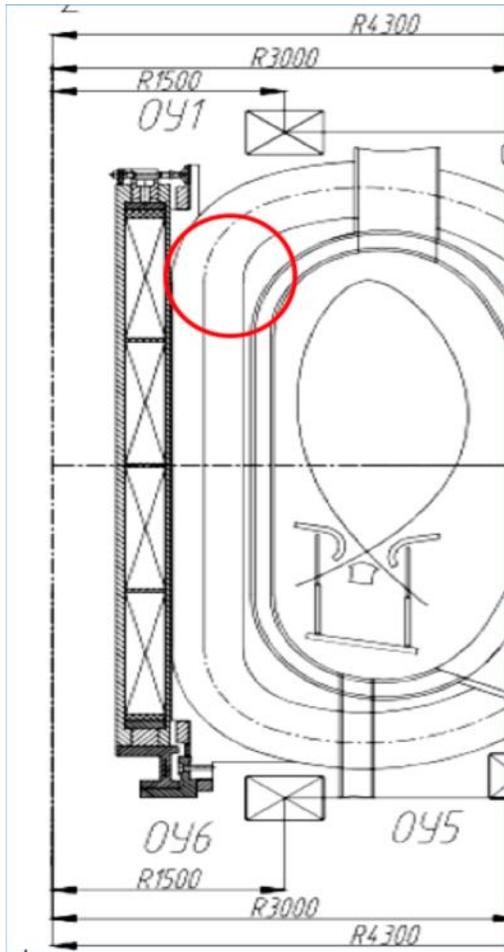


- Рабочая точка ВТСП-2 провода ЭМС ТРТ (B , T , σ ,...) определяется из условия, что при максимальных магнитном поле и температуре рабочий ток не менее, чем на 20%, ниже критического. Эквивалентный запас по температуре > 5 К, что позволяет по достижению максимальной рабочей температуры провода штатно, без срабатывания системы защиты, вывести ток.
- $B=14-15$ Тл, $I_{op}=60-74$ кА, отсюда высокие механические нагрузки и необходимость разбиения провода на субэлементы.
- Несколько субэлементов - необходимость транспонирования.

ВТСП-2 ленты с требуемыми критическими характеристиками - **ЕСТЬ**.

ВТСП-2 провод для тороидальной обмотки и центрального соленоида ТРТ - **НЕТ**.





✓ Для всех обмоток, включая ОТП и обмотку индуктора (ОИ), рабочий ток в проводе и ВТСП-2 ленте рассчитывается для магнитного поля «нормального» к поверхности ленты ($B//c$). И для ОТП и для центральной части ОИ, где поле «в основном» имеет компоненту B_z , неизбежно наличие «нормальной компоненты поля» $\sim 1,0-1,5$ Тл, которая «отклоняет» вектор поля от «параллельной ориентации» на 5 и более градусов, ограничивая расчетное значение рабочего тока.

✓ Тепловыделения в обмотках, как результат изменения во времени нормальной к плоскости ленты компоненты поля вызывает значительные тепловыделения и рост температуры провода:

- рабочая температура провода ОИ может в ходе рабочего цикла подниматься на 10-15 К;
- рабочая температура провода ОТП растет меньше, но он связан не только с «собственными» тепловыделениями, которые ниже, чем в ОИ), но и с возможным «радиационным» нагревом.

Обмотка тороидального поля (ОТП):

Индукция магнитного поля на проводе: 15 Тл;

Рабочий ток в ленте : 74 А/мм ширины ленты;

Отношение рабочего тока провода к критическому:

- $J^*_{op}/J^*_c (T=5K) - 0,6;$
- $J^*_{op}/J^*_c (T=10K) - 0,7;$
- $J^*_{op}/J^*_c (T=15K) - 0,82$

Рабочий ток провода: 74кА

Максимальная рабочая температура: 15 К

Рабочая плотность тока: 140 А/мм², что соответствует плотности тока по обмотке для центральной галеты в радиальной пластине % 70 А/мм²

Обмотка индуктора (ОИ)

Индукция магнитного поля на проводе: 15 Тл;

Рабочий ток в ленте: 60 А/мм ширины ленты;

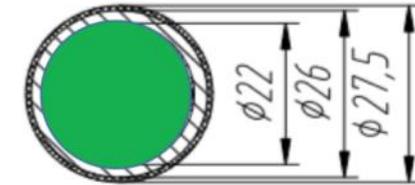
Отношение рабочего тока провода к критическому:

- $J^*_{op}/J^*_c (T=5K) - 0,5;$
- $J^*_{op}/J^*_c (T=10K) - 0,6;$
- $J^*_{op}/J^*_c (T=20K) - 0,8.$

Рабочий ток провода – 60кА

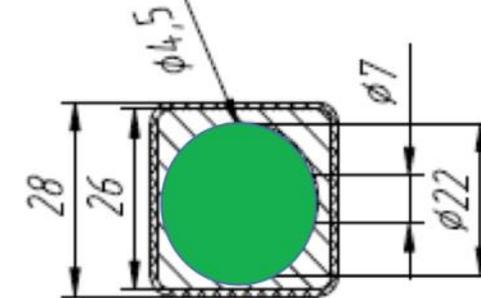
Максимальная рабочая температура – 20К;

Рабочая плотность тока по проводу без изоляции – 89 А/мм².



✓ Размещение провода ОТП в радиальных пластинах делает нежелательной корректировку формы и размеров крайне нежелательной.

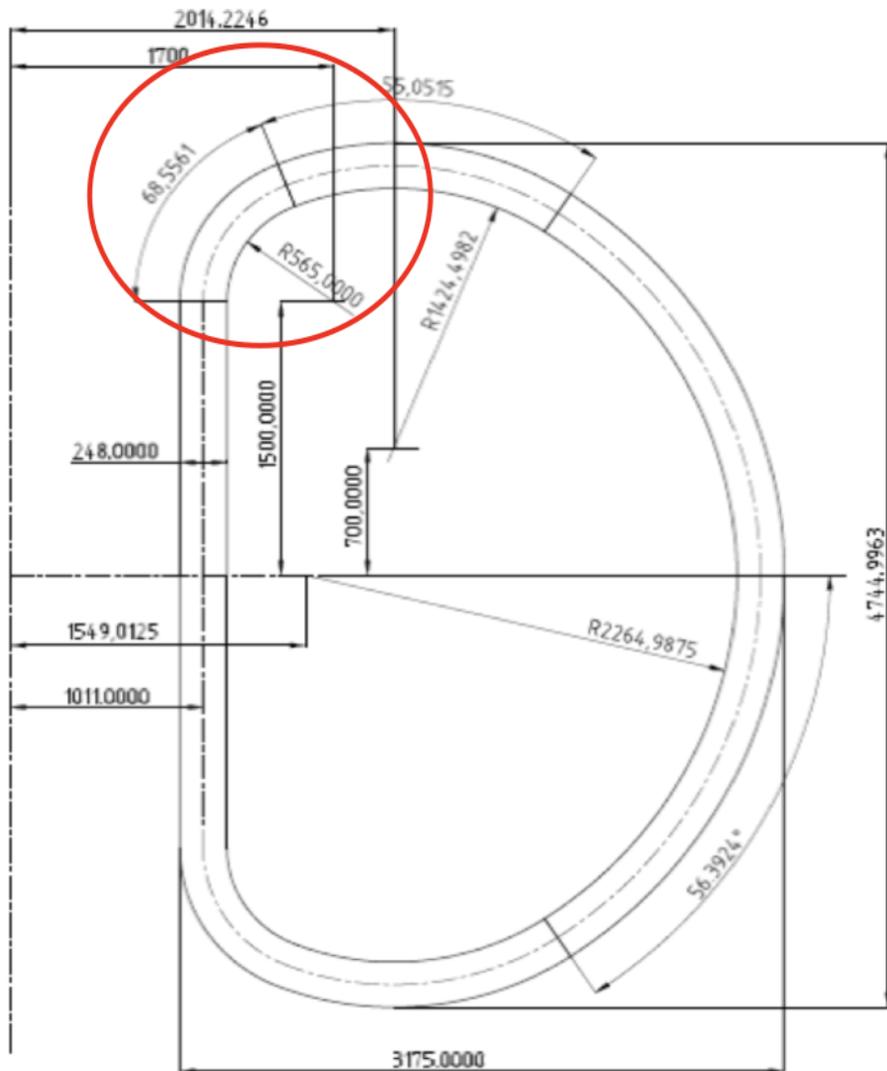
✓ Внутренняя структура кабеля должна быть выполнена из материала, по механическим характеристикам близкой серебросодержащей меди.



✓ Галетная намотка прямоугольным проводом в «толстом кожухе», корректировка формы и аспектного отношения провода возможна по согласованию.

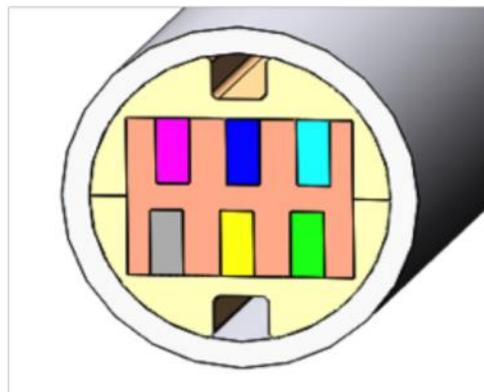
✓ Требуется анализ тепловыделений.

✓ Возможно проблема радиуса изгиба при намотке галет

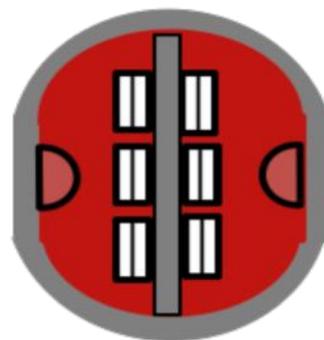


Минимальные значения радиуса изгиба: ~ 0,6 м

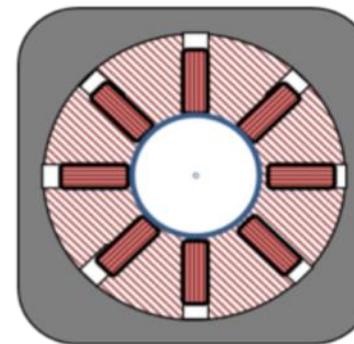
	R, м	Z, м	ΔR , м	ΔZ , м	Нвитк.	AW_{max} , МА	B_{max} . Тл
ОИ2_В	0.600	1.545	0.251	0.982	256	11.7	14
ОИ1_В	0.600	0.515	0.251	0.982	256	14.5	14
ОИ1_Н	0.600	-0.515	0.251	0.982	256	11.9	14
ОИ2_Н	0.600	-1.545	0.251	0.982	256	11.7	14



MiST
*Meanders in Structure,
Transposed*

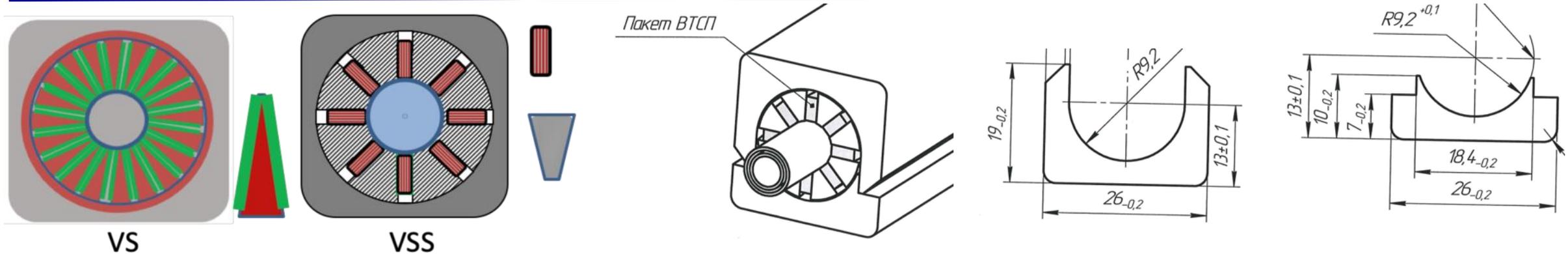


PaST
*Parallel Stacked
Tapes*



VSS
*V-Shape with
Stacks*

- ✓ Провода MiST и PaST рассчитаны на работы в магнитном поле, ориентированном параллельно поверхности ленты. Провод VSS более универсален.
- ✓ Для обеспечения токонесущей способности провода требуется объединение в конструкции 200-300 ВТСП-2 лент в форме нескольких стопок. Ключевым является вопрос распределения токов между лентами.
- ✓ Во всех конструкциях первая стадия изготовления – создание стопок лент. Исследование конструктивных решений стопок – общий вопрос для всех рассматриваемых конструкций проводов.



Основные принципы построения:

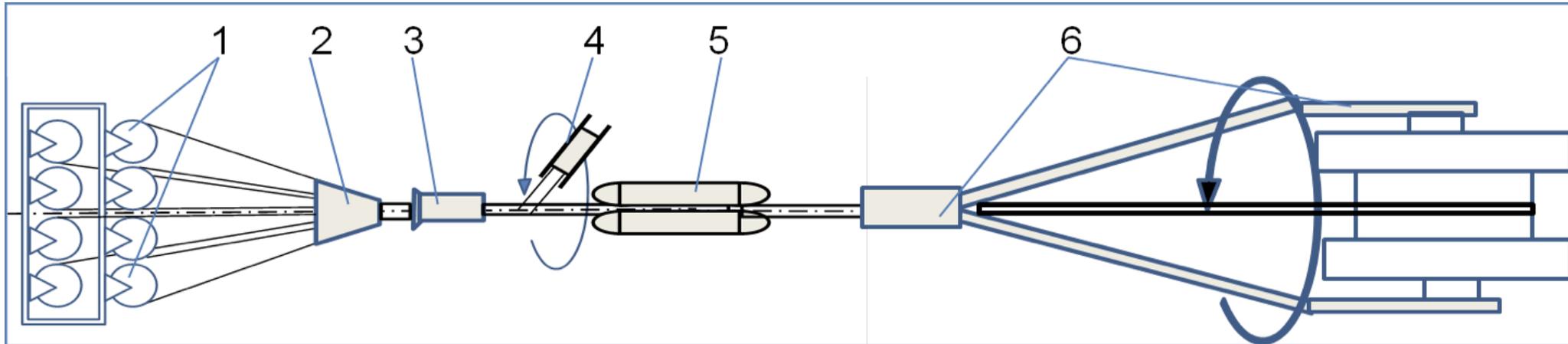
- ✓ Ленты ВТСП или стопки расположены радиально, в один повив.
- ✓ Трапециевидные или треугольные вставки из несверхпроводящего материала, размещены между лентами/стопками.
- ✓ Каждая лента (или две ленты) со вставкой образуют V-образные элементы, которые скручиваются вокруг центрального канала (VS).
- ✓ Стопка лент и вставка скручиваются в один повив (VSS). Токонесущая жила заключается в стальную оболочку.

Основные преимущества конструкции VS и VSS:

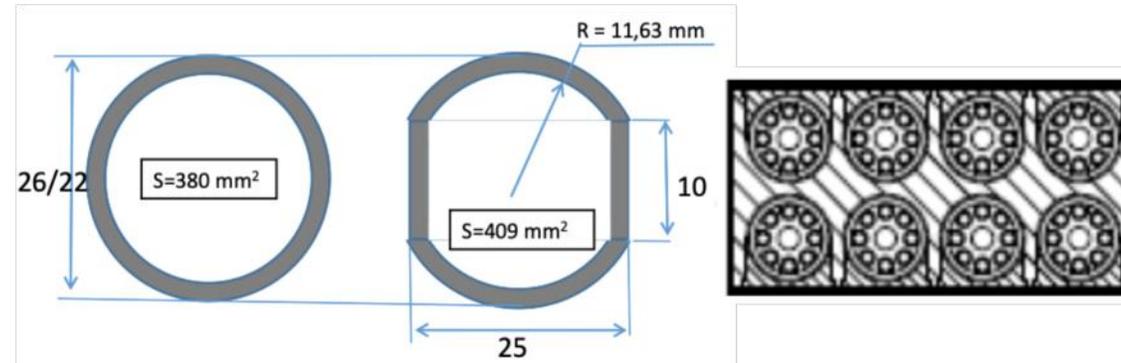
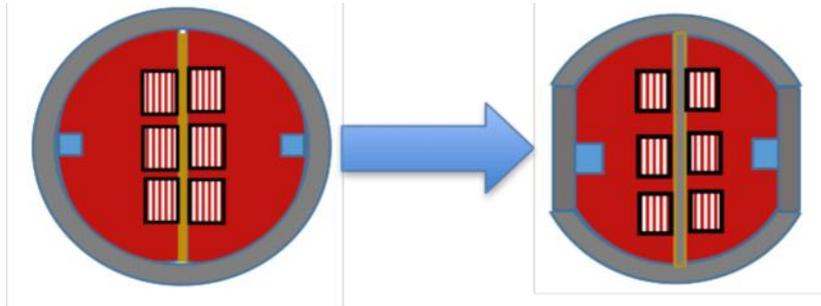
- ✓ Полная транспозиция и высокая конструктивная плотность тока.
- ✓ Высокая жесткость конструкции, благодаря использованию прочных клиновидных вставок. Широкие возможности изменения параметров провода (количество стопок/лент, сечение стали, стабилизаторов и пр.).
- ✓ Возможность использования кабельных технологий.

Недостатки конструкции заключаются в следующем:

- ✓ Отсутствие опыта изготовления VS/ VSS-провода.
- ✓ Отсутствие результатов испытаний.



- ✓ В конструкции VSS отсутствует транспозиция лент внутри стопок, однако расположение лент радиально в один слой обеспечивает транспозицию относительно внешнего поля.
- ✓ При изготовлении VS/VSS проводов используется большое количество первичных элементов. Для скручивания такого количества элементов использование классических крутильных машин нецелесообразно. Представляется более рациональным использовать машины типа Dram-Twister. В таких машинах отдающие катушки расположены на неподвижных стойках, а скручивание сердечника происходит за счет вращения приемного барабана.

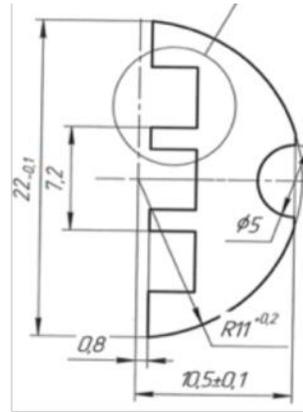
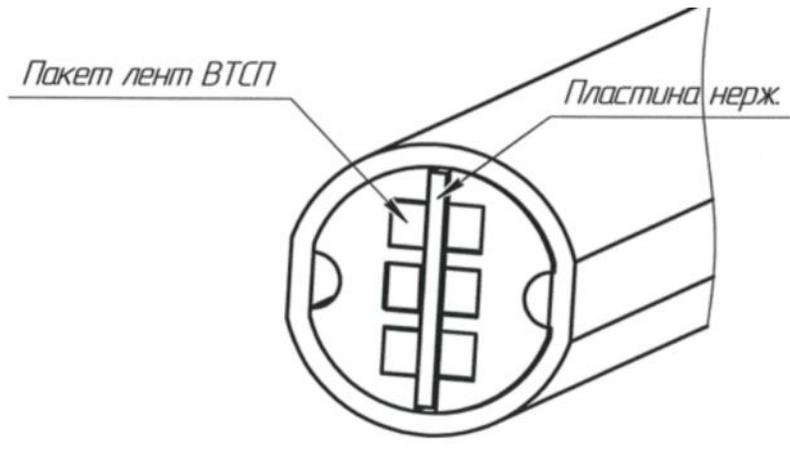


Основные принципы построения:

- ✓ Ленты ВТСП собираются в стопки, расположенные преимущественно параллельно вектору внешнего поля.
- ✓ Стопки обматываются металлической фольгой и размещаются в пазах несверхпроводящей конструкции.
- ✓ Две такие конструкции объединяются с центральной стальной полосой и размещаются в стальной трубе.
- ✓ Конструкция прокатывается до заданной геометрии.

Особенности конструкции PaST:

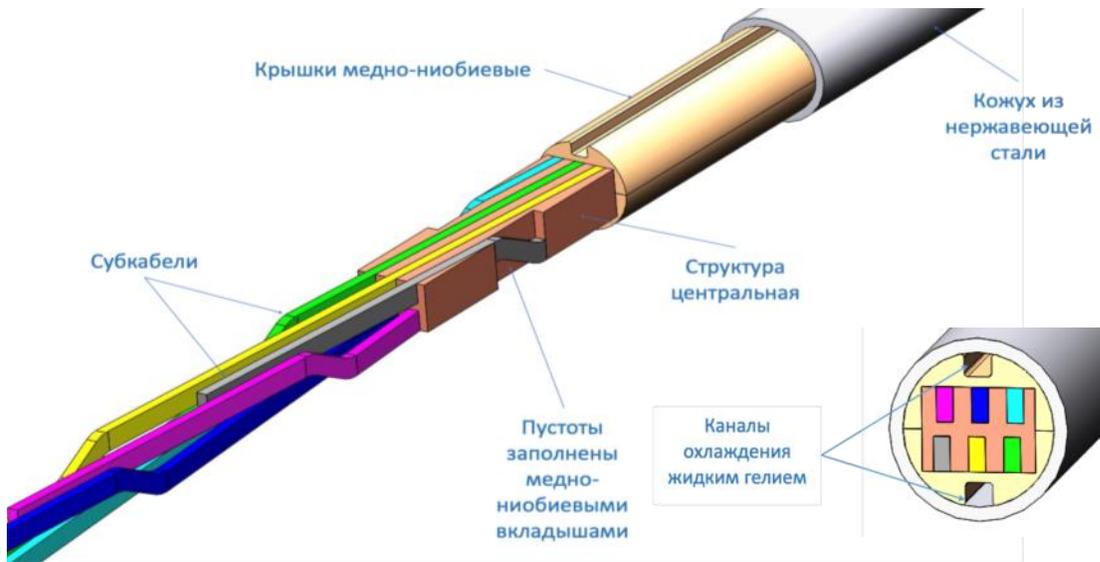
- ✓ Сила Лоренца на проводе направлена перпендикулярно плоскости ленты и достигает 110 тонн/м. Локальное давление на поверхности стопки - 4,5 кг/мм².
- ✓ Центральная стальная вставка предотвращает накопление давления от двух соседних стопок.
- ✓ Стопки лент не транспонированы, но для уменьшения электромагнитной связи между соседними пакетами на боковые поверхности центральной стальной вставки наклеивается полиимидная пленка.



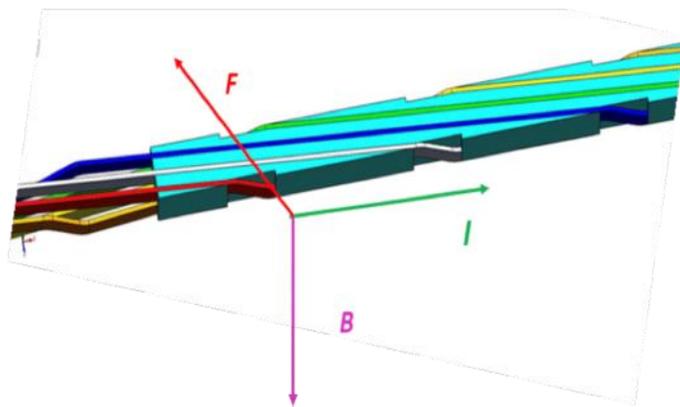
Технологический вариант, решающий проблему ориентации лент параллельно вектору внешнего поля.

Кроме того, такая конструкция позволяет увеличить площадь проводника и увеличить на 1 мм (20%) толщину зубца, воспринимающего поперечную нагрузку в радиальных плитах.

Присутствие «нормальной» компоненты магнитного поля не позволяет рассчитать токонесущую способность проводов MiST и PaST «по параллельной компоненте поля». Однако, учитывая, что критический ток ВТСП-2 ленты в 4-5 раз больше в параллельном поле - количество лент в проводе может быть уменьшено. Насколько - вопрос теоретических и экспериментальных исследований.



- ✓ Основное назначение - изготовления ОТП ЭМС ТРТ.
- ✓ Основной элемент стопки (субкабеля) – меандр из ВТСП-2 ленты.
- ✓ Конструкция кабеля состоит из:
 - 6-ти ВТСП-субкабелей;
 - структуры центральной (медь-ниобий);
 - крышек (2 шт.) с каналами охлаждения (медь-ниобий);
 - кожуха (нержавеющая сталь)
- ✓ Каждый субкабель содержит ~ 40 ВТСП-2 лент в виде меандра
- ✓ Размеры ВТСП-2 ленты – 12x0,07 мм.



Конструкция кабеля ориентирована на решение проблем провода ОТП:

- ✓ Субкабели расположены таким образом, чтобы рабочее магнитное поле было направлено преимущественно параллельно поверхности ленты (дополнительный запас по температуре).
- ✓ Силовая структура оптимальным образом удерживает механическую нагрузку:
 - кабель разбит на элементы;
 - усилия передаются на плоскую стенку;
 - обеспечена «общая» жесткая конструкция (аналог радиальных пластин).
- ✓ Обеспечена транспозиция субкабелей и снижение гистерезисных потерь.
- ✓ Возможны варианты конструкции кабеля с количеством субкабелей от 4 до 8 с пропайкой или без.
- ✓ Предусмотрена возможность оптимизации «геометрии» меандра.

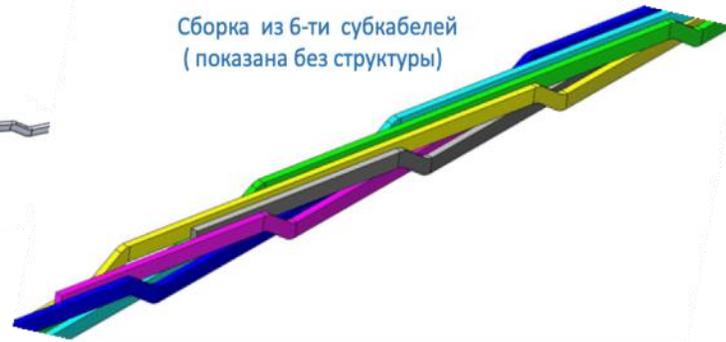
Единичный элемент – меандр из ВТСП-2 ленты



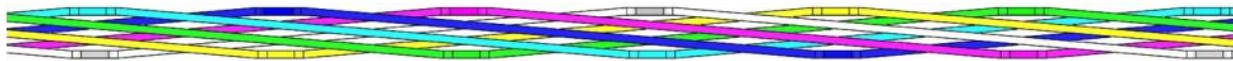
Субкабель – стопка из ~ 40 лент (меандров)



Сборка из 6-ти субкабелей
(показана без структуры)



Сборка из 6-ти субкабелей (вид сверху)



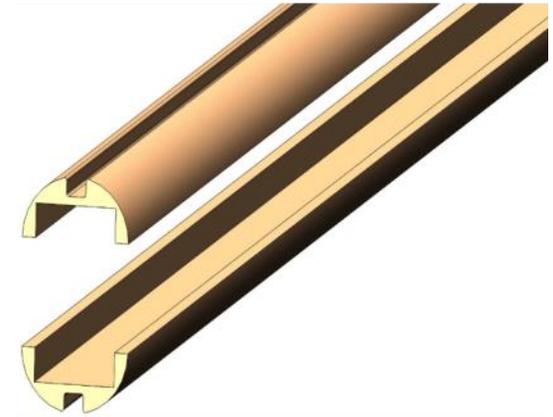
Сборка из 6-ти субкабелей (вид сбоку)



Структура центральная



Крышки

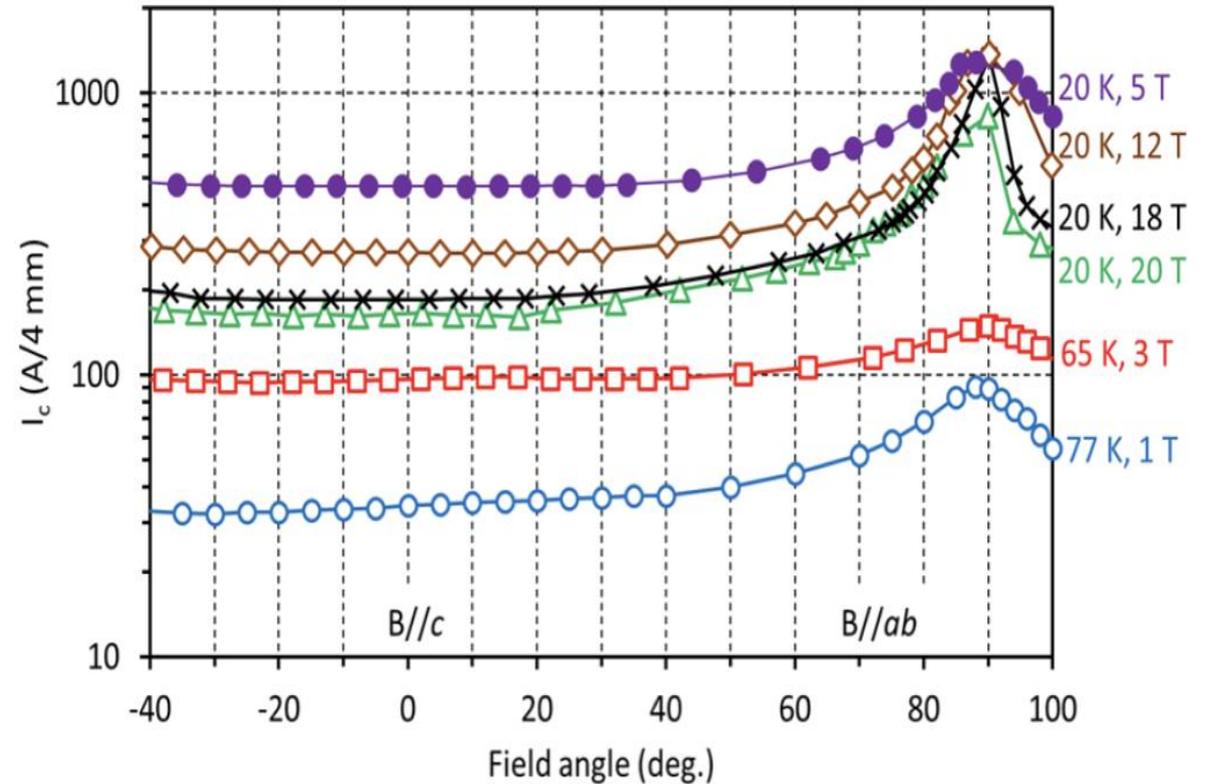
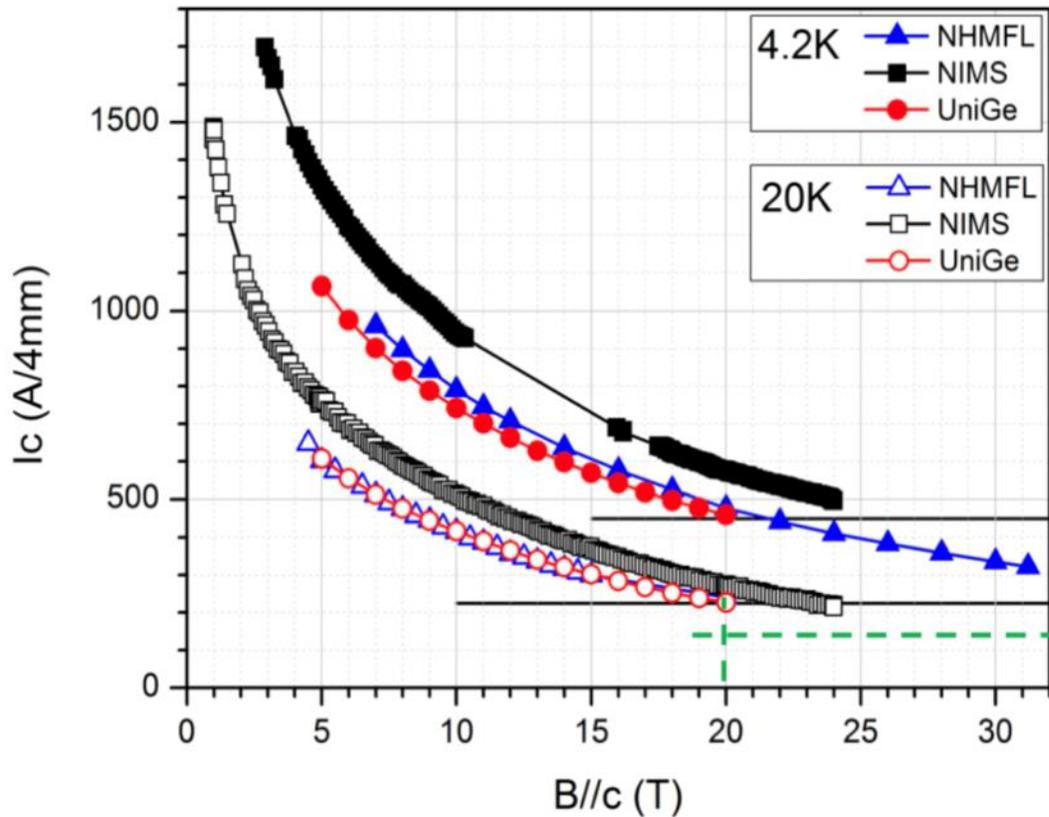


Преимущества:

Конструкция транспонированного на уровне субкабелей высоковольтного кабеля обеспечивает требуемые механические характеристики при умеренных тепловыделениях для сценарных условий ОТП.

Недостатки:

- ✓ Высокий расход ВТСП ленты из-за использования меандра в качестве основного элемента.
- ✓ Сложная («некабельная») технология изготовления.
- ✓ Необходимость контроля оптимального положения субкабелей в процессе намотки катушек ОТП.
- ✓ Использование в ОИ и ОУ требует адаптации конструкции.

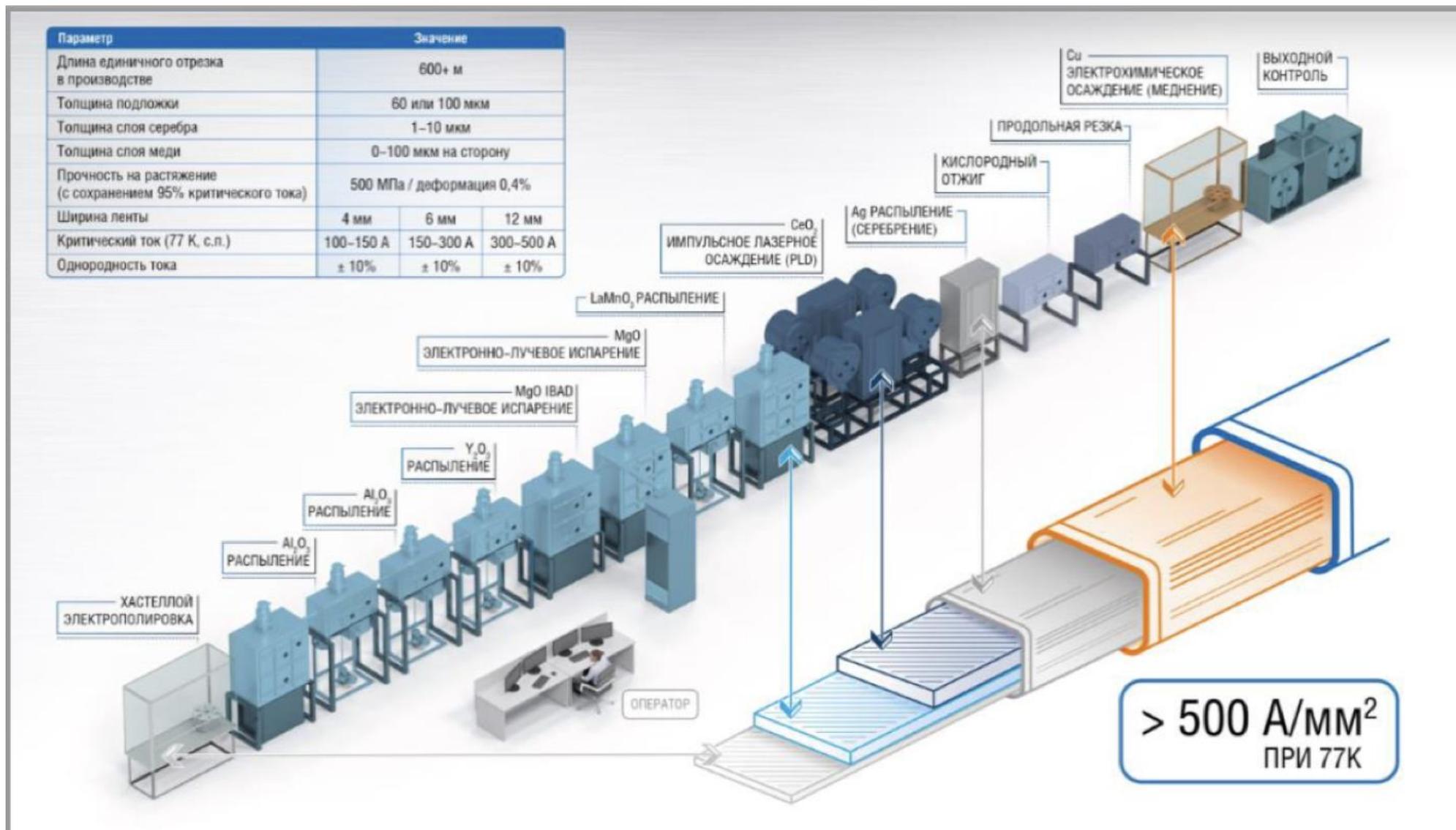


Поскольку в конструкции кабеля могут быть использованы ВТСП-2 ленты различной ширины и «толщины» в качестве «референсной» величины, описывающей токонесущую способность ВТСП-2 ленты, используется параметр I_c , А/мм – «Ток на мм ширины ленты».

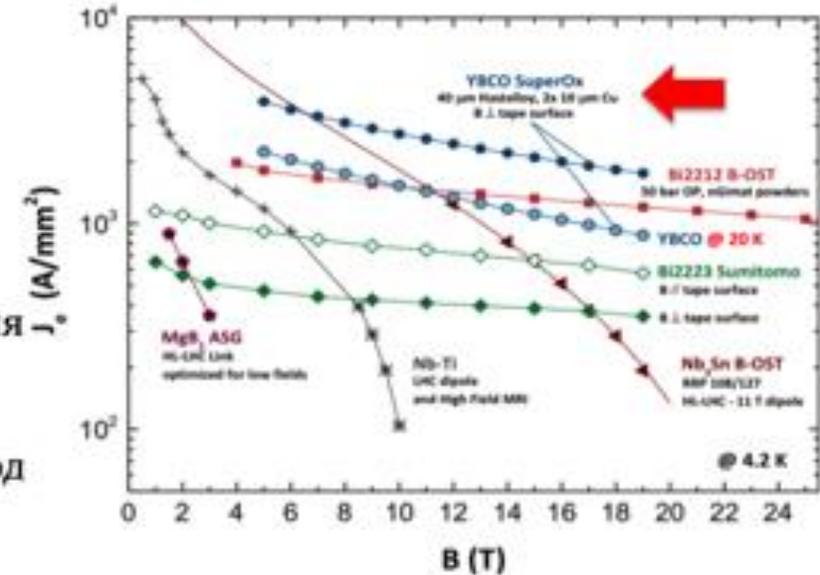
Функциональная схема изготовления ВТСП-2 ленты на нетекстурированной подложке



POCATOM



- Патент на изобретение RU2761855 от 21.07.2021
- $I_c(20K, 20Tл) = I_c(77K, 0Tл) = 130-200 \text{ A}/4 \text{ мм}$
- Стандартный продукт - $J_e(20K, 20Tл) > 600 \text{ A}/\text{мм}^2$
- Рекордные результаты - $J_e(20K, 20Tл) > 1500 \text{ A}/\text{мм}^2$
- Толщина подложки 35 мкм
- Продольная резка ВТСП-ленты фемтосекундным лазером
- Указанный минимальный критток - для перпендикулярного поля
- В параллельном поле критток ещё выше, приблизительно в 4-6 раз
- Общая мощность производства - 1000 км 12 мм ВТСП-ленты в год
- Распределение мощностей сегодня: 2/3 = Москва, 1/3 = Токио
- В 2019-2021 гг. мощность производства была увеличена в 5 раз
- Текущий штат ООО «С-Инновации» - 80 человек
- Площадь арендуемых помещений ~ 1200 м²



European Strategy for Particle Physics Accelerator R&D Roadmap
 CERN, 2022 <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2201/2201.07895.pdf>

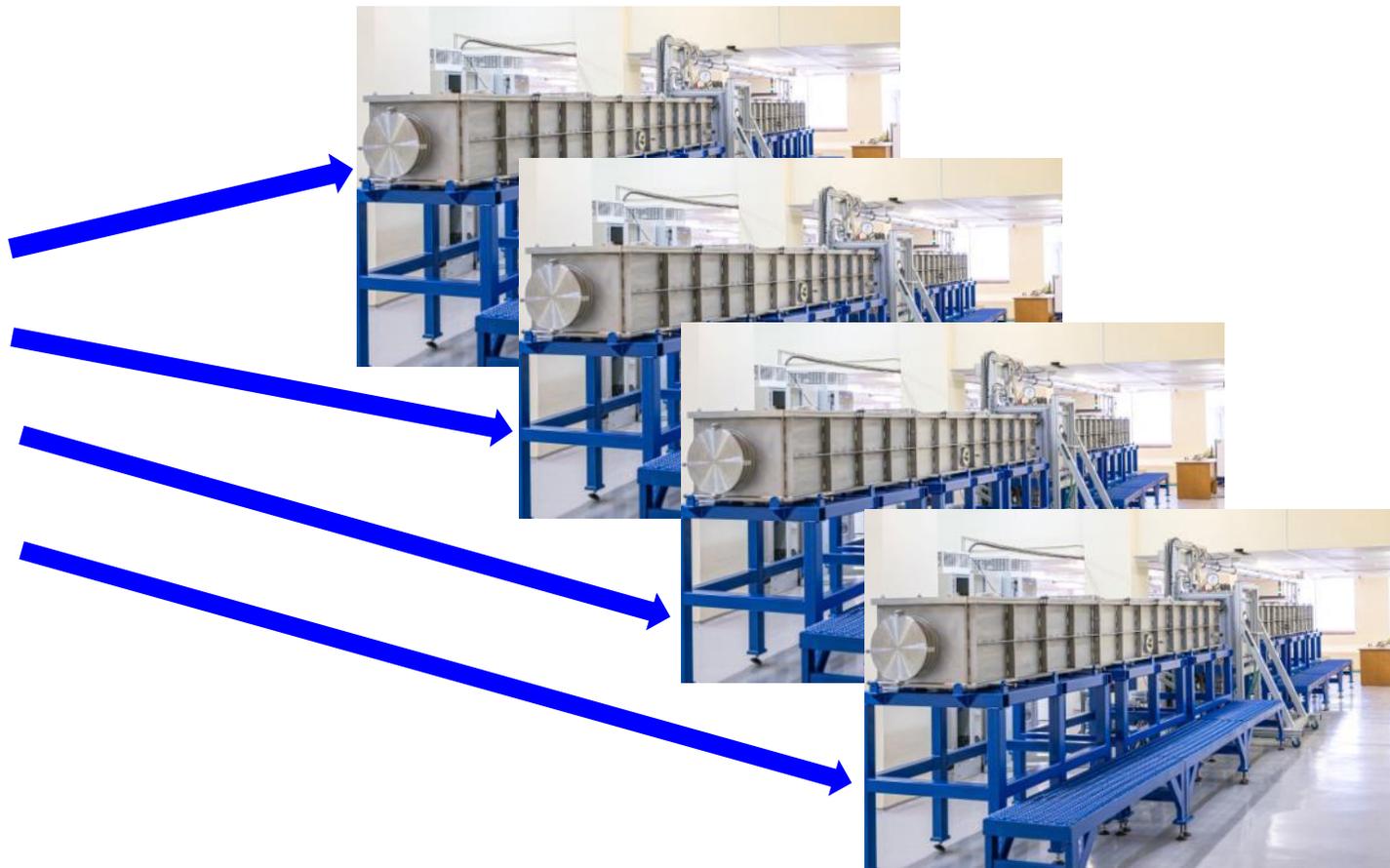




**Установка производства
текстурированной подложки.**

**Годовая производительность: 300-400 км
4 мм ВТСП-2 ленты.**

Опытное оборудование отсутствует.

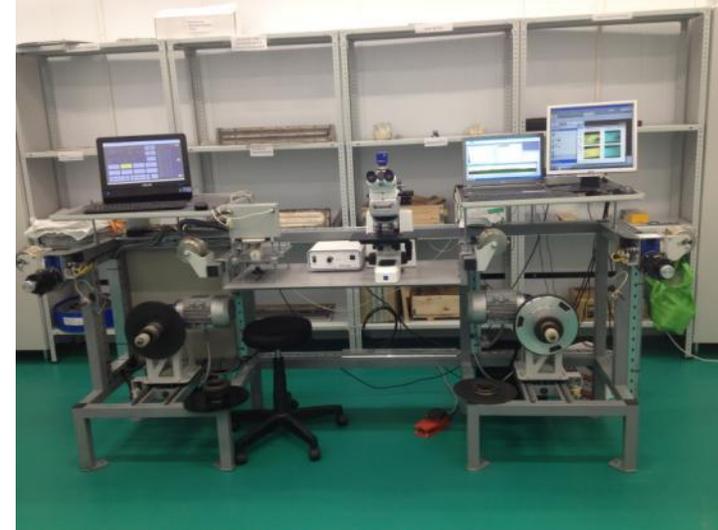


Лазерные установки нанесения ВТСП слоя.

**Годовая производительность каждой установки: 80 -
100 км ВТСП-2 ленты.**

Есть опытное оборудование.

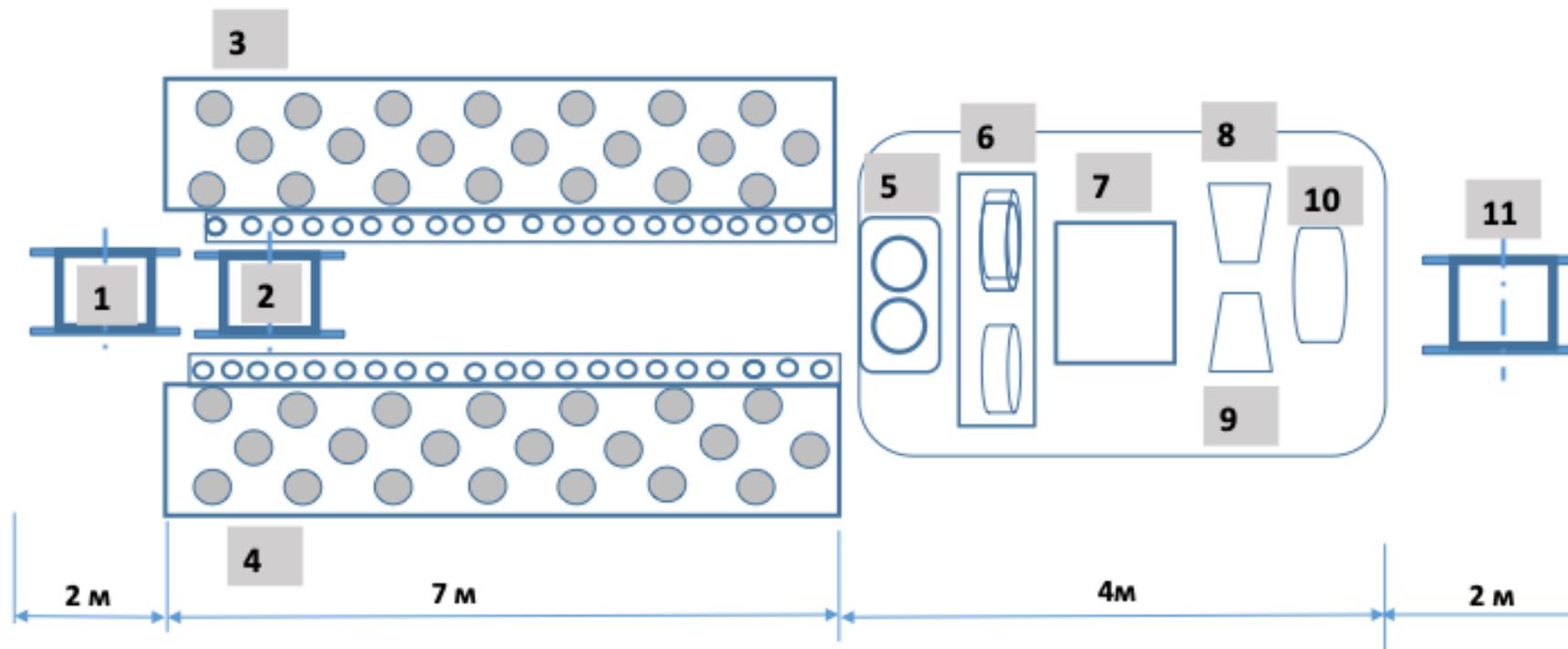
Производство ВТСП-2 в контуре ГК «Росатом» - существующее опытное оборудование.





Организационная структура проведения работ по созданию проводов для ЭМС ТРТ

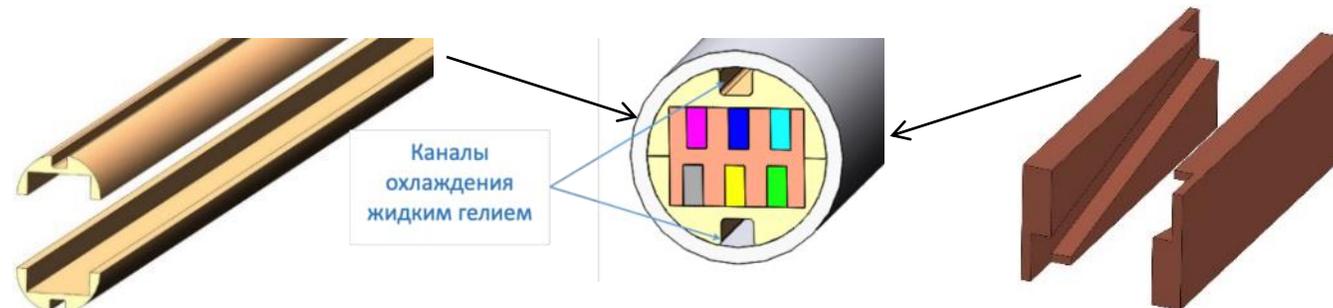
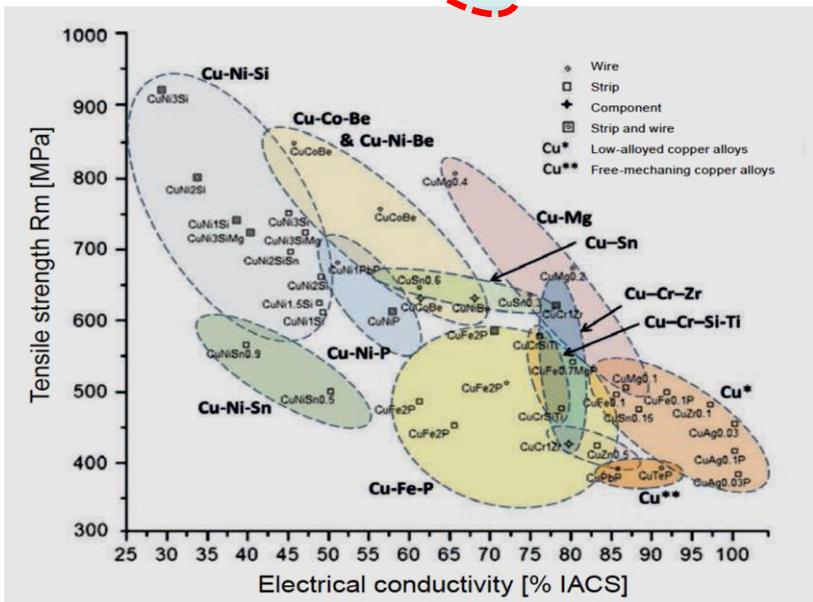




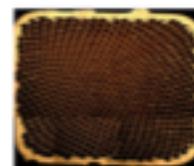
- 1,2 – отдающие катушки с фасонными элементами оболочки субэлемента провода
- 3,4 – катушки с ВТСП-3 лентами (42 катушки $\varnothing 400$ мм) длиной до 1000 м
- 5 – блок сбора ВТСП-2 в пачку
- 6 – блок обмотки пачки лент
- 7 – блок укладки пачки ВТСП-2 в оболочку из Cu-Nb профильных элементов
- 8,9 – установки автоматической лазерной сварки
- 10 – установка контроля сварных швов (УЗ контроль)
- 11 – приемная катушка субэлемента обмоточного провода

Производитель:
ООО «Русатом МеталлТех» (PMT)

Cu-Nb



Компоненты провода, предлагаемые к изготовлению из высокопрочного сплава Cu-Nb (PMT)



4 x 4,8 мм

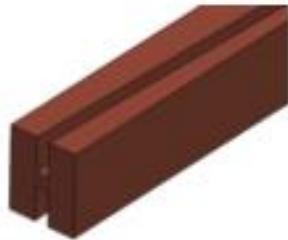
Механическая прочность, МПа	500-700
Электропроводность, IACS*	95%-85%

Производимый аналог: радиационно стойкие провода

**Механическая прочность при 77 К – до 2000 МПа;
Электропроводность – до 240 %IACS**



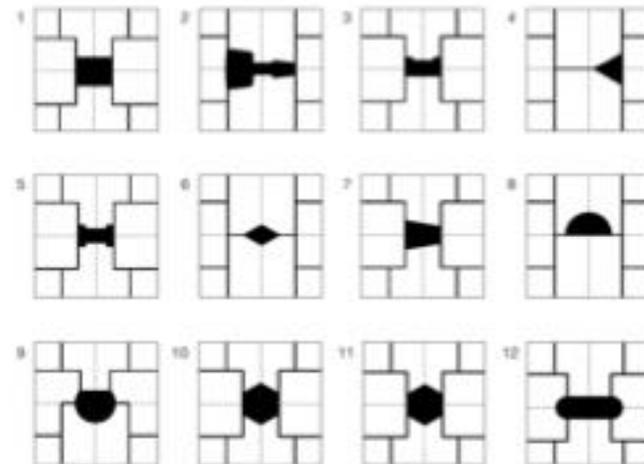
Производственная линия для получения глубоких профилей за 1 переход



Точность размеров глубоких профилей – 0,015 мм (алмазные датчики)



Формовочный блок с приводными фасонными роликами



Возможная форма компонентов провода

Производство субэлементов на монтажном стенде



Часть Монтажного стола сборки ВТСП проводов



Блок обмотки лентой пакетов ВТСП

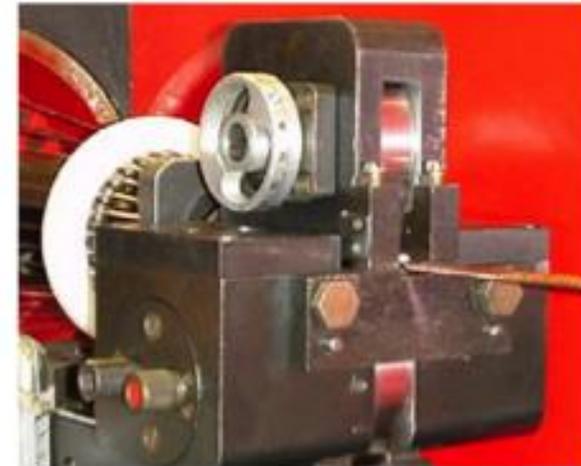


Блок лазерной сварки



Блок УЗ контроля сварных швов

Сборка субэлементов на кабельной машине



Мероприятия	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Изготовление и испытание опытных образцов ВТСП провода	Yellow	Yellow	Light Green						
Изготовление опытной партии провода для секции ЭМС и изготовление секции	Light Green	Yellow	Yellow	Light Green					
Испытания секции	Light Green	Light Green	Light Green	Yellow	Light Green				
Изготовление проводов для ЭМС	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Yellow	Yellow	Yellow	Light Green	Light Green
Изготовление ЭМС	Light Green	Yellow	Yellow	Yellow	Light Green				

Первоочередные мероприятия:

- ✓ Реализация задач проекта ЕОТП «Разработка и испытания обмоточных проводов из ВТСП-2 для компактной ЭМС установки УТС нового поколения» (2022-2024).
- ✓ В ходе реализации Проекта определить кооперацию организаций.
- ✓ Подготовить и утвердить Дорожную карту изготовления ВТСП-2 проводов ЭМС ТРТ.

Субкабели

(неполномасштабные образцы)

Перечень испытаний:

- ✓ Испытания токонесущей способности опытных образцов в условиях, соответствующих характеристикам субкабеля или масштабу образца;
- ✓ Токовые испытания макетов электрических контактных соединений;
- ✓ Механические испытания

Короткие образцы

проводов ЭМС ТРТ

- ✓ Испытания токонесущей способности опытных образцов в условиях максимально приближенных к рабочим (или имитирующих рабочие), включая циклическое приложение к образцу механической нагрузки;
- ✓ Токовые испытания макетов контактных соединений;
- ✓ Измерения диссипативных характеристик провода.

Модельные катушки

из проводов ЭМС ТРТ

- ✓ Тест-объект 1 – Подтверждение технологии изготовления ВТСП-2 проводов и обмоток.
- ✓ Тест-объект 2 – Модельная катушка секции ОИ (16 Тл). Может быть выполнена в виде сплит-катушки и впоследствии использована для испытаний коротких образцов проводов.
- ✓ Секция ОТП или специально спроектированная модельная катушка для расширенных испытаний провода ОТП.

Испытательные базы:

- ✓ Стенды испытаний АО «НИИЭФА» и НИЦ «Курчатовский институт»
- ✓ SULTAN (Швейцария).



**Намоточный комплекс
в чистой комнате**



**Комплекс ВПП
электроизоляции обмоток**



**Пример изготовления –
Катушка RF-1 ИТЭР**

Изготовление ЭМС ТРТ:

✓ К концу 2022 года полностью освободится производственно-стендовый комплекс, обеспечивший производство полоидальной катушки RF-1. Технологическое оборудование может быть адаптировано под задачи модельной программы проводов и обмоток ЭМС ТРТ.

✓ Важный фактор – наличие в АО «НИИЭФА» квалифицированного персонала.

- ✓ Разработка обмоточных проводов из ВТСП-2 - ключевой вопрос создания ЭМС установок УТС нового поколения, включая ТРТ.
- ✓ В ряде организаций Госкорпорации «Росатом» накоплен опыт, позволяющий в кратчайшие сроки создать промышленность как ВТСП-2 лент, так и обмоточных проводов на их основе.
- ✓ Требуется в кратчайшие сроки не только создать ВТСП-2 провода, но и реализовать модельную программу, обеспечивающую верификацию технических характеристик ВТСП-2 проводов в условиях, близких к рабочим.
- ✓ Существующие экспериментальные стенды способны на первом этапе обеспечить требуемый объем испытаний.
- ✓ Использование созданной стендово-промышленной базы и опыта реализации поставочных договоров проекта ИТЭР может существенно сократить сроки подготовки производства и изготовления обмоток установок УТС нового поколения, включая ТРТ.