ВНИИНМ
РОСАТОМ

XIV Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц: «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц. Ускорители для прикладных целей»

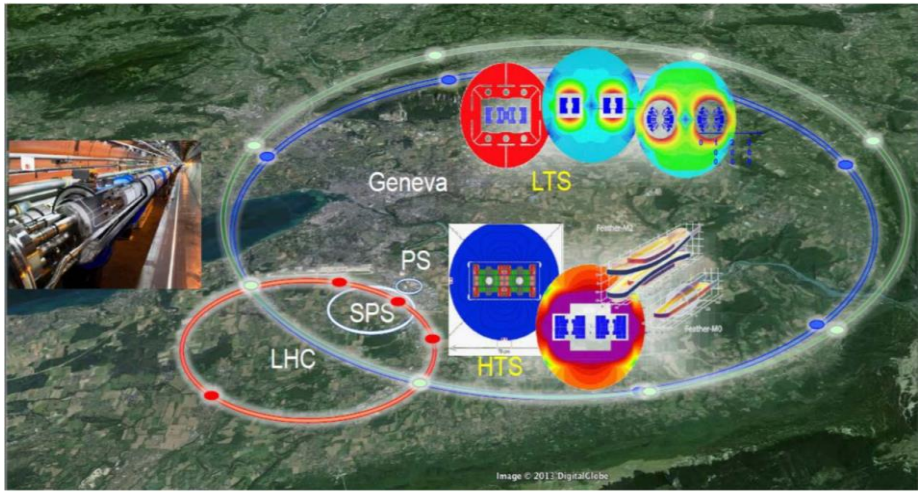
« Российские сверхпроводящие материалы для ускорительной техники»

Абдюханов Ильдар Мансурович

24.09.2022г., Алушта

Разработка Nb_3Sn сверхпроводников для проектов HL - LHC и FCC

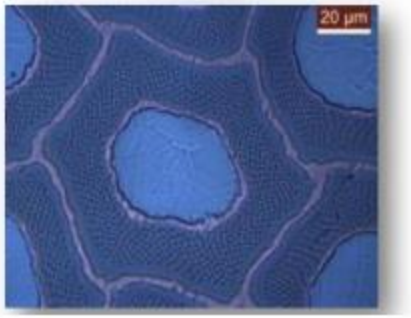
Параметр	Значение				
	SEPC	HL-LHC	FCC	ИТЭР	DTT
Диаметр сверхпроводника, мм	0,82	0,7	1,0	0,82	0,82
Длина единичного куска, м	-	1000	1000	1000	1000
Плотность критического тока на сечение без меди (при 4,2 К), А/мм²	2400 (12Тл)	> 2450 (12 Тл)	> 1500 (16 Тл)	> 720 (12 Тл)	>1200 (12 Тл)
RRR	100	> 150	> 150	> 100	> 100
Эффективный диаметр волокна, мкм	-	< 40	< 60	-	-



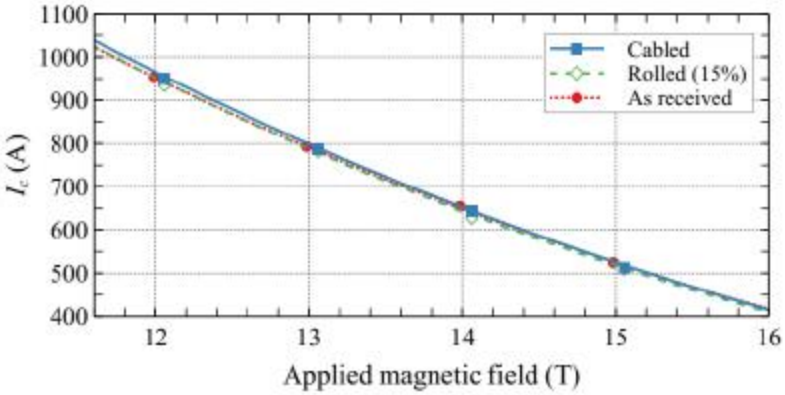
1. «Targets for R&D on Nb3Sn Conductor for High Energy Physics» A. Ballarino, L. Bottura, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, 2015

2. «The CERN FCC Conductor Development Programme: A Worldwide Effort for the Future Generation of High Field Magnets», S. C. Hopkins, B. Bordini, A. Baskys, et al, Workshop on Advanced Superconducting Materials and Magnets, KEK, Tsukuba, Japan, 2019

Nb_3Sn сверхпроводник для проекта HL-LHC



В 2017 году в ЦЕРН поставлено 12 км



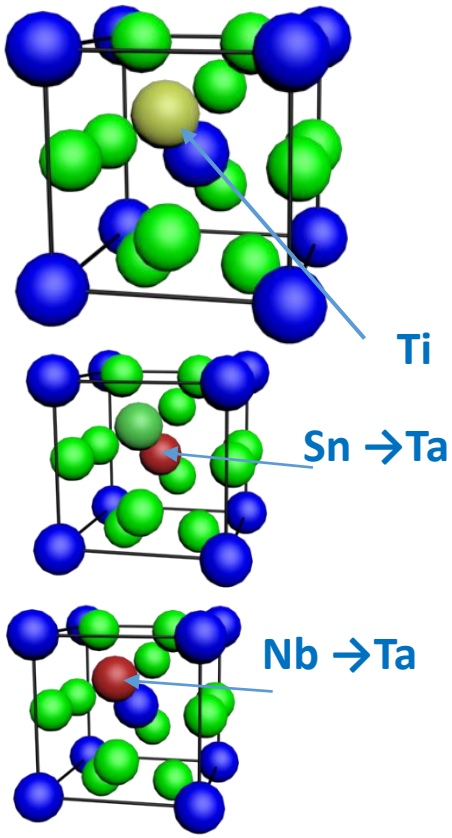
Parameter	Piece length 1	Piece length 2
Round	228	271
Rolled (15 % reduction)	220	227
Extracted from cable	181	

По оценкам специалистов ЦЕРН российский Nb_3Sn сверхпроводник для проекта HL – LHC характеризуется незначительной деградацией токонесущей способности и параметра RRR при кабелировании

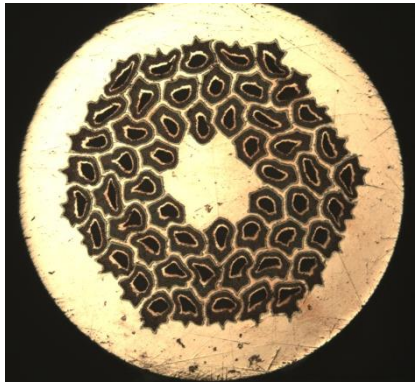
S.C.Hopkins et al Design, Performance and Cabing Analysis of Nb3Sn Wires for the FCC Study, Journal of Physics: Conference Series, 2020

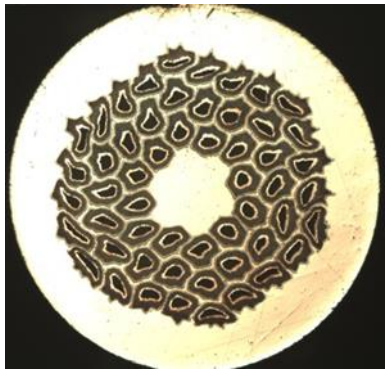
Разработка Nb_3Sn сверхпроводников для проекта FCC

ТВЭЛ
РОСАТОМ

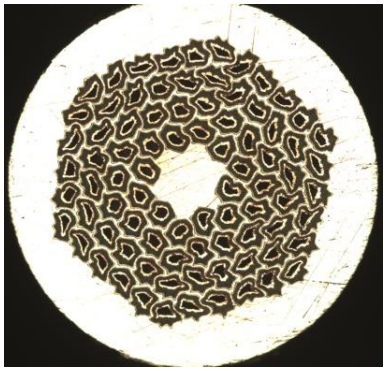


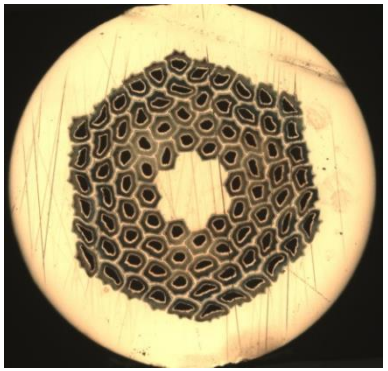
54 субэлемента



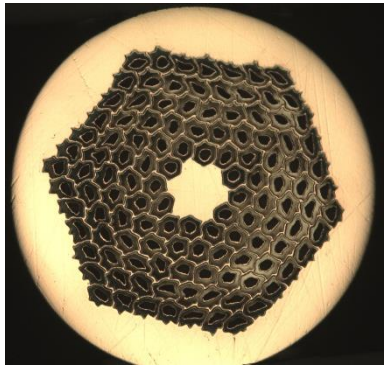


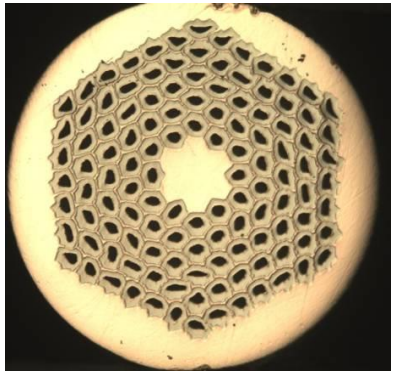
84 субэлемента



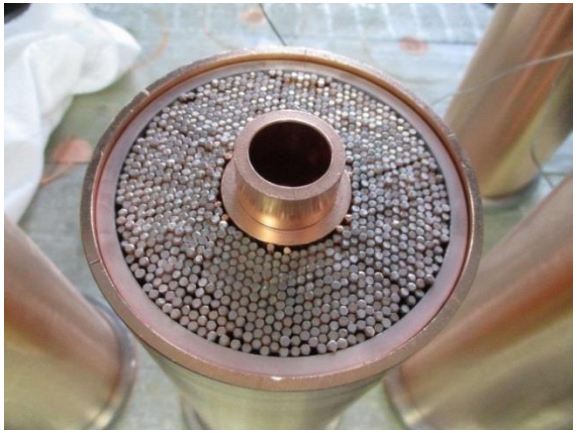


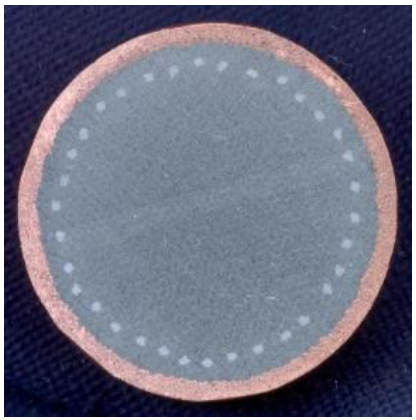
120 субэлементов

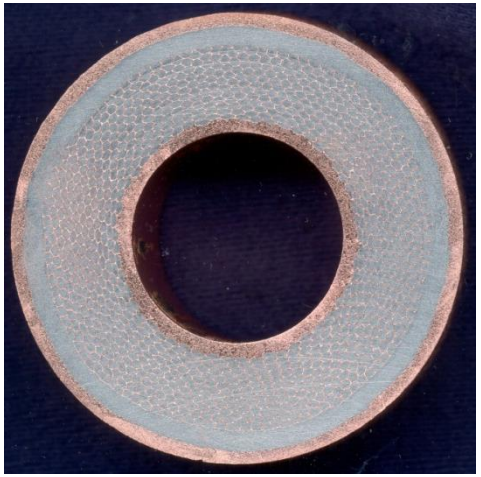




Отработка технологии изготовления стрендов на АО ЧМЗ

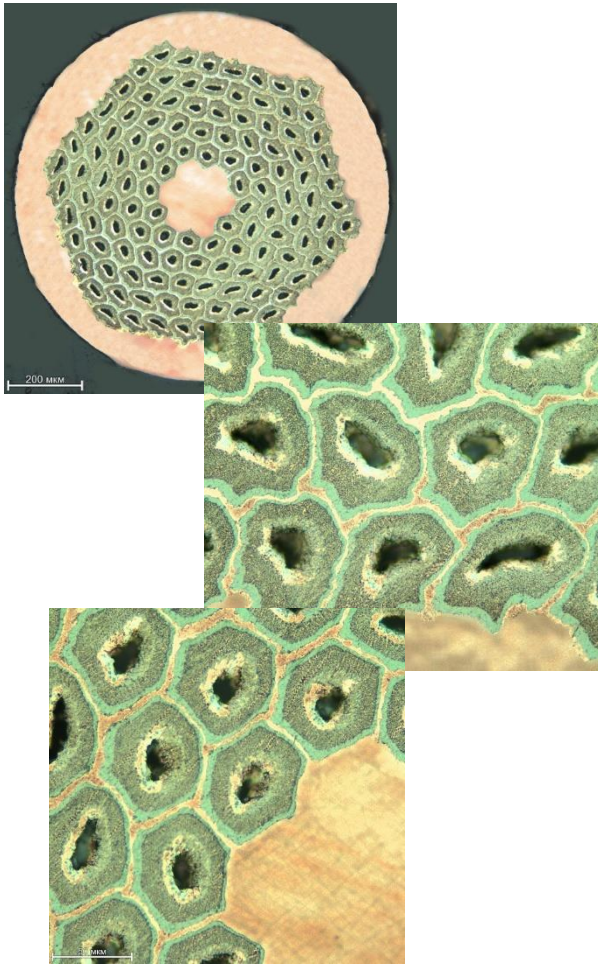




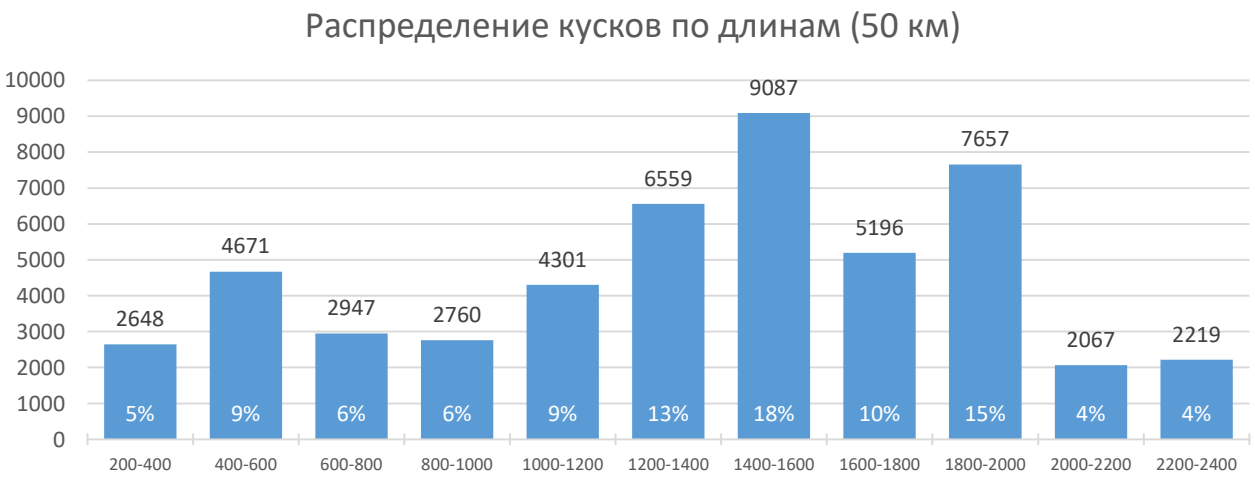


Изготовление партии 50 км

Параметр	Измеренные характеристики
J_c (4,2 K, 12 T) A/mm^2	2890-3080
Эффективный диаметр (D_{eff}), µm	71-79
RRR	110-173
Cu/ nonCu	1,0±0,1

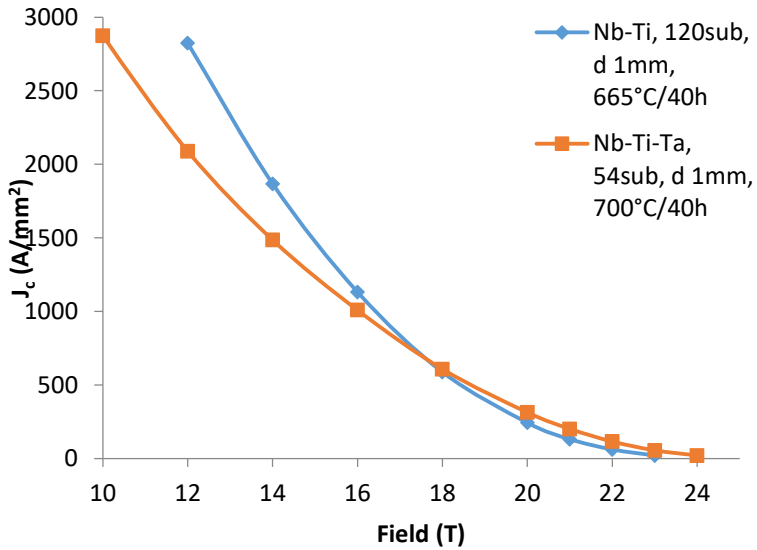


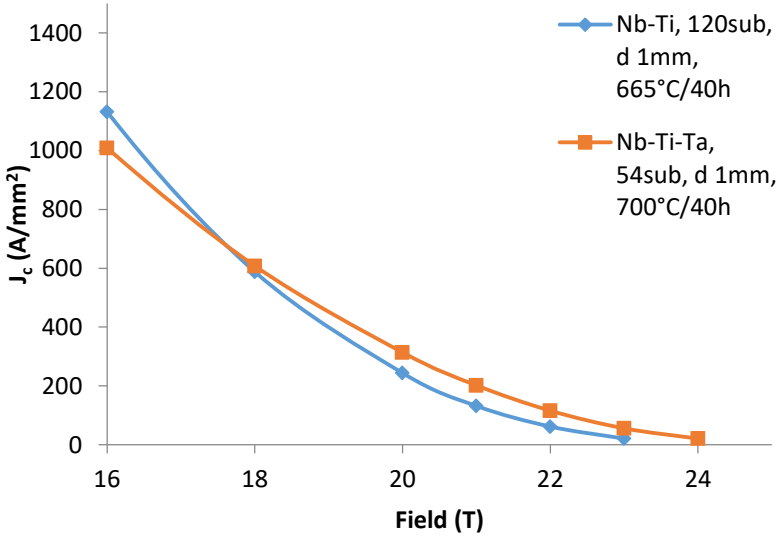
Изготовлено всего более 100км Nb_3Sn стрендов, 50 км отправлено в ЦЕРН.



Электрофизические характеристики сверхпроводников

ТВЭЛ
РОСАТОМ

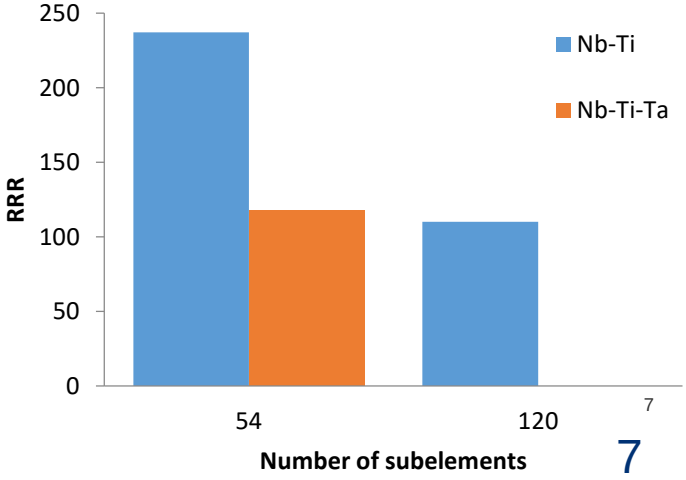




РТО	B_{c2}, Тл	B_{Fp_max}, Тл
	Ø1 мм	
665°C, 100 ч	25,1	7
665°C, 60 ч	24,4	7
665°C, 40 ч	23,7	7
680°C, 40 ч	25,2	7
700°C, 40 ч	25,3	7
720°C, 40 ч	25,5	7

РТО	B_{c2}, Тл	B_{Fp_max}, Тл
	Ø1 мм	
665°C, 40 ч	24,1	5

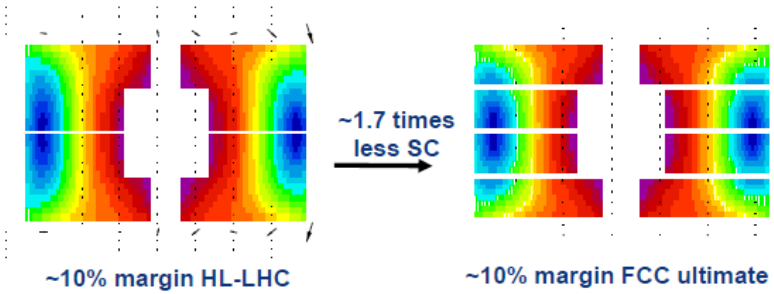
Эффективный диаметр - 71 µm



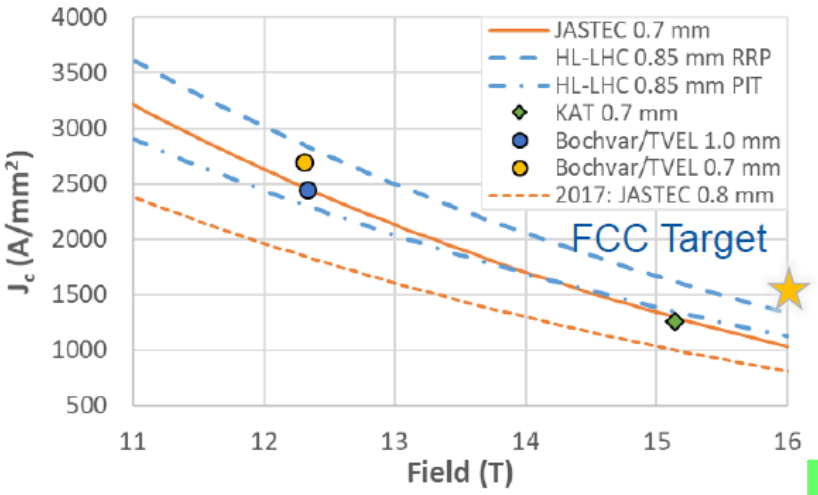
Worldwide FCC Nb_3Sn program

Main development goal is wire performance increase:

- **J_c (16T, 4.2K) > 1500 A/mm^2 →50% increase wrt HL-LHC wire**
- **Reduction of coil & magnet cross-section**



After 1-2 years development, **prototype Nb_3Sn wires from several new industrial FCC partners already achieve HL-LHC J_c performance**



FCC conductor development collaboration:

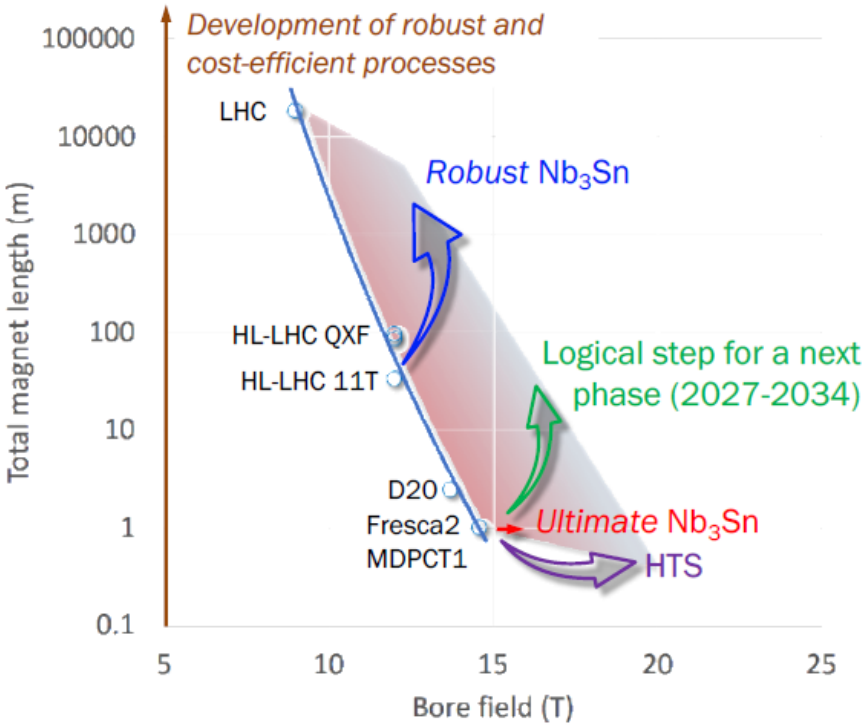
- **Bochvar Institute** (production at **TVEL**), **Russia**
- **Bruker, Germany, Luvata Pori, Finland**
- **KEK** (**Jastec** and **Furukawa**), **Japan**
- **KAT, Korea, Columbus, Italy**
- **University of Geneva, Switzerland**
- **Technical University of Vienna, Austria**
- **SPIN, Italy, University of Freiberg, Germany**

2019/20 results from US, meeting FCC J_c specs:

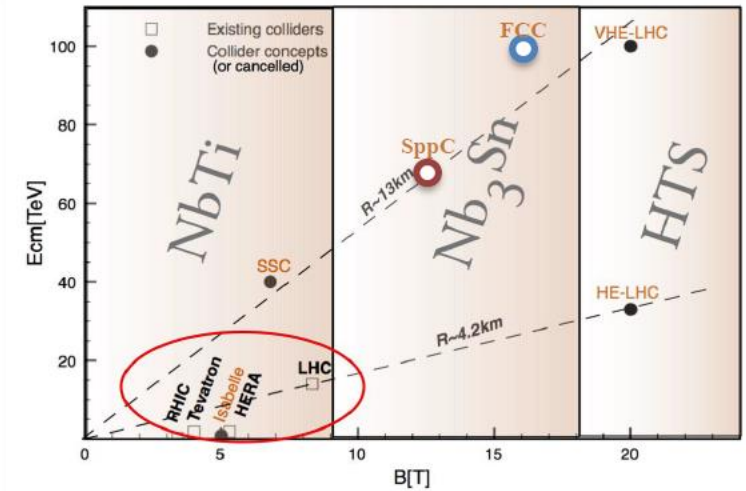
- **Florida State University:** high-J_c Nb_3Sn via Hf addition
- **Hyper Tech /Ohio SU/FNAL:** high-J_c Nb_3Sn via artificial pinning centres based on Zr oxide.

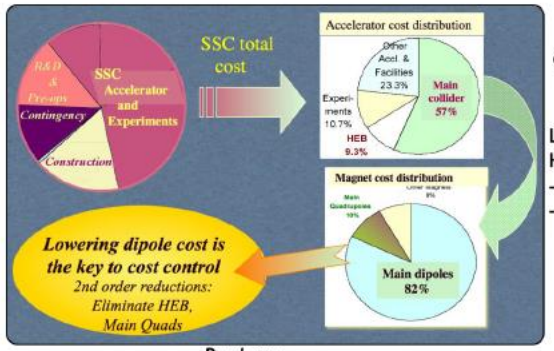
European HFM plans related to magnet technology

- Plans are being fleshed out, but will ***likely*** focus on:
  - Demonstrate Nb_3Sn magnet technology for large scale deployment, pushing it to its practical limits, both in terms of maximum performance as well as production scale
    - Demonstrate Nb_3Sn full potential in terms of ultimate performance (target 16 T)
    - Develop Nb_3Sn magnet technology for collider-scale production, through robust design, industrial manufacturing processes and cost reduction (benchmark 12 T)
  - Demonstrate suitability of HTS for accelerator magnet applications, providing a proof-of-principle of HTS magnet technology beyond the reach of Nb3Sn (target in excess of 20 T)
  - Implemented as a focused, innovative, mission-style R&D of collaborative nature



Manet technology is driving the cost and reach of a future collider



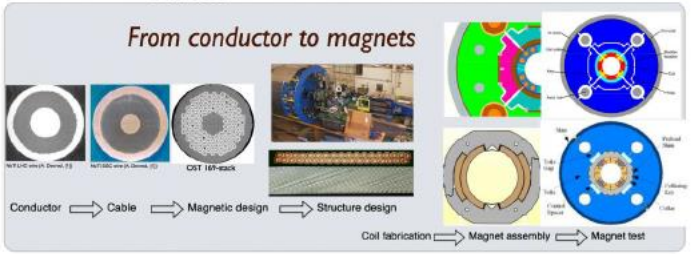


Barletta

CERN cost estimates*:
$\$_{magnets}/\$_{tot}$

LHC: 57%
HE-LHC:
- 70% (26TeV; Nb_3Sn)
- 77% (33TeV; HTS)

*L. Rossi, "TOE" talk



Cost/performance is the critical metric

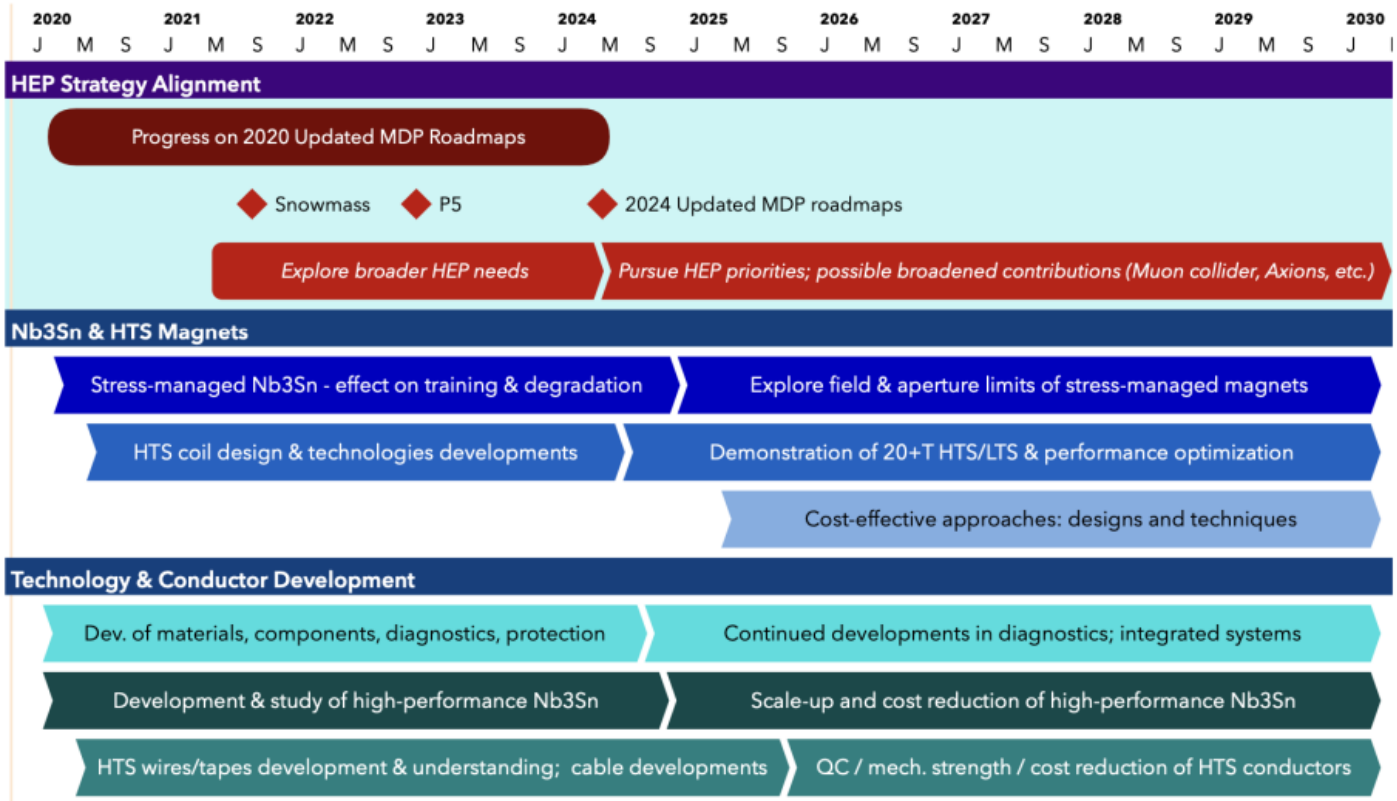
Dominant cost drivers for a pp collider: Magnets and tunnel

US MDP roadmaps

Continue alignment with physics community needs

Focus on "stress-management" as well as hybrid HTS/LTS magnet technology

Continue to invest in the "science of magnets" and in improved conductors

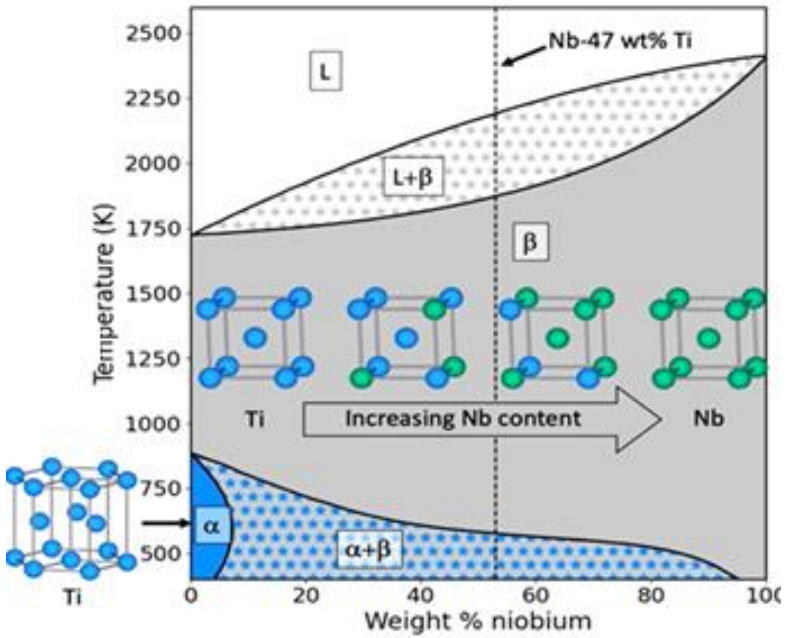


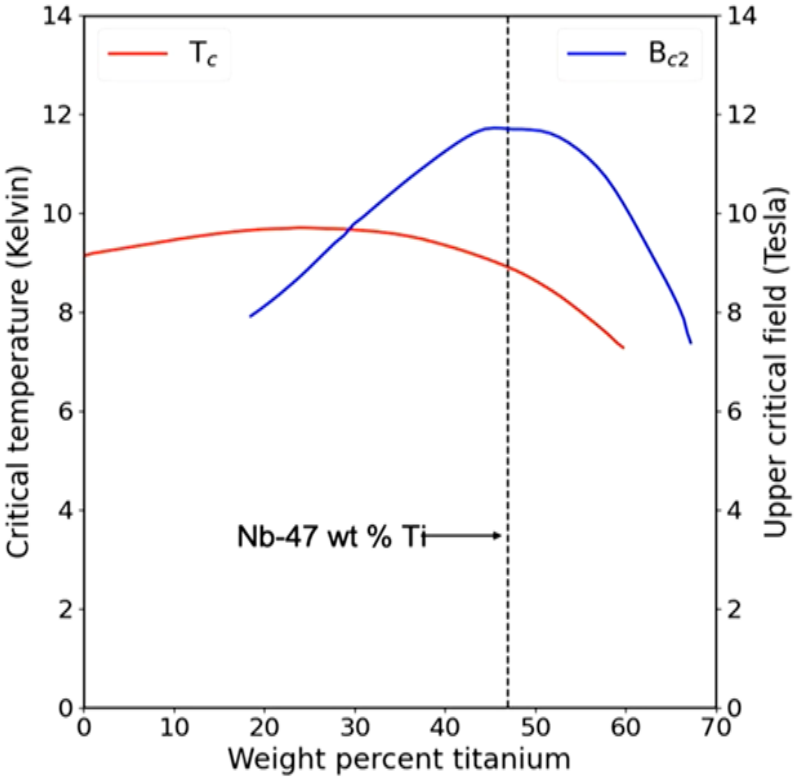
ТВЭЛ
РОСАТОМ

European HFM plans related to superconductors

- Nb_3Sn Conductor
  - Secure **state-of-the-art** wire and cable for the magnet program at **affordable cost** (including extensive characterization measurements)
  - Pursue the FCC Conductor Development Program towards **ultimate performance** (new wire layouts and compositions, enhanced mechanical properties and reinforcements, magnetization and stability, means towards cost reduction for large scale production)
- HTS Conductor
  - Focus is on **REBCO** (exploit complementarity with US-MDP for Bi-2212)
  - Match **conductor** (tape and cable) **specifications** to accelerator magnet needs, and revisit present wisdom (EuCARD -> EuCARD2 -> ARIES-> I-FAST -> …)
  - Procure and develop **tailored conductor and cable concepts** for the magnet program
- Measurements
  - Coordinate wire, tape and cable characterization, including material studies and advanced analytical techniques

Сверхпроводники на основе NbTi





NbTi сплав обладает высокой пластичностью, достаточно дешевый;
Критическая температура – до 9К

Sussie Speller “ Developments in superconductings Materials”

NbTi провод для модельного высокопольного быстроциклирующего магнита SPS, ЦЕРН

ТВЭЛ
РОСАТОМ

Характеристика провода		Значение
Диаметр, мм		0,70÷0,90
Диаметр волокна, мкм		~ 3,5÷5,0
Отношение медь/ не медь		1,35 ± 0,1
Межволоконная матрица		медно-резистивная
Шаг скрутки, мм		6÷10
Гистерезисные потери, мДж/см^3		≤ 50
J_c, А/мм^2	(7 Тл; T=1,9 К)	> 1500
	(5 Тл; T=4,2 К)	-
RRR		> 100

- **Обеспечение высоких токовых характеристик в магнитном поле 7 Тл**
- **Достижение как можно меньшего уровня потерь**

$$P_{гист} = \frac{4}{3\cdot\pi}\cdot\lambda\frac{dB}{dt}\cdot j_k\cdot d$$

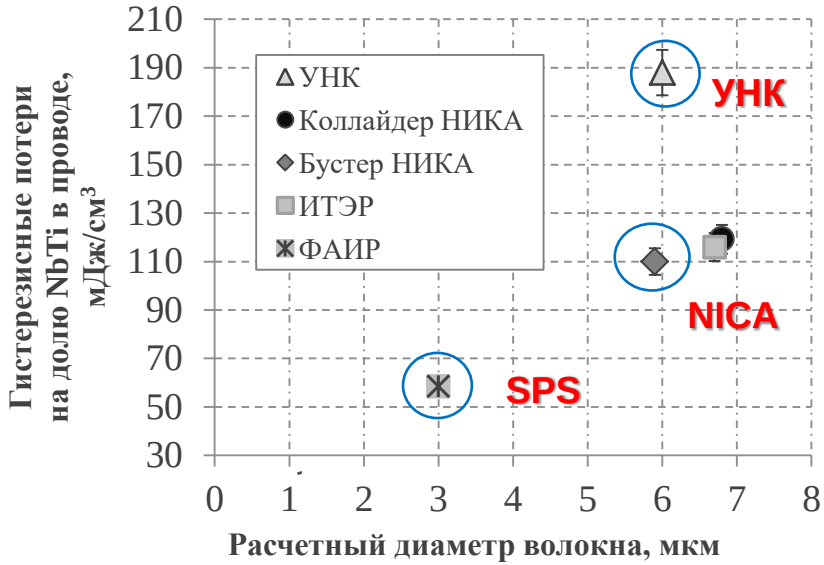
Гистерезисные потери пропорциональны коэффициенту заполнения по сверхпроводнику (λ), скорости изменения магнитного поля (dB/dt), критической плотности тока(j_k) и диаметру волокон (d) в стренде.

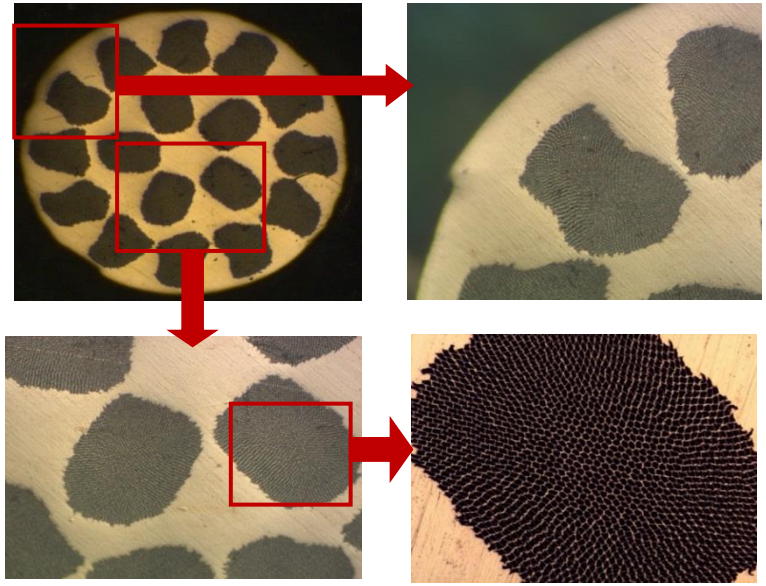
$$P_{коп} = \frac{1}{\rho_\perp}\left(\frac{dB}{dt}\right)^2\cdot\left(\frac{L}{2\pi}\right)^2$$

Кооперативные потери пропорциональны квадрату скорости изменения магнитного поля$(dB/dt)^2$, квадрату шага скрутки $(L)^2$ и обратно пропорциональны удельному сопротивлению матрицы в поперечном сечении стренда ($\rho_\perp$)

NbTi провод для модельного высокопольного быстроциклирующего магнита SPS, ЦЕРН

ВНИИНМ
РОСАТОМ





CONDUCTOR, CABLE, COIL

One can expect much less power losses in the coil and better heat transfer from the winding. The parameters above mentioned are resulted from reduced NbTi amount (higher I_c @1.9 K), adequate filament size and twist pitch; optimal number of coil turns (I_m ~13 kA); separation of the yoke onto 1.9 K (smaller part) and the rest one at 50 K, minimization of the cable loss and optimization of the coil shape. The conductor parameters for start option were fixed practically to the following: NbTi filament diameter – 3.2 μk, filament twist pitch – 8 mm, wire diameter – 0,81 mm, Cu/nonCu – 1.38. The conductor was manufactured by the Bochvar Institute (Moscow). The wire critical current measured by the manufacturer at 6 T, 4.2 K was about 400 A. The measurements at 1.9 K over the field range from 6 to 10 T and at 6 T, 4.2 K (reference point) were performed at CERN. The data are shown in Fig. 2.

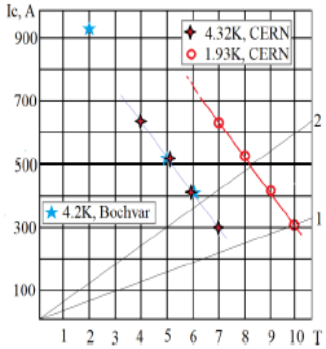


Figure 2. Critical current data measured at CERN and by the wire manufacturer (October-November 2018).

Диаметр провода 0,8 мм

Диаметр волокна 3 мкм

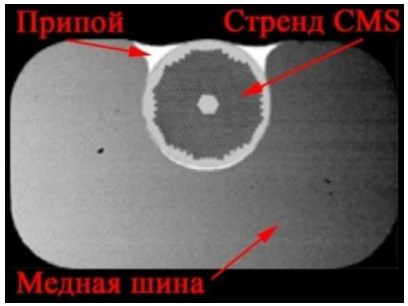
Количество волокон 29495 шт.

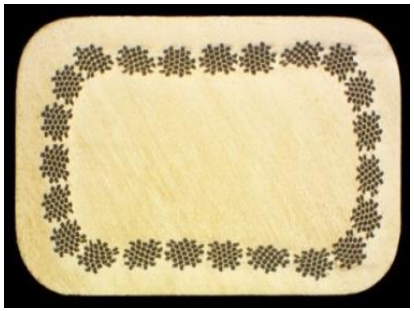
Cu/nonCu – 1,50 (КЗ – 0,40)

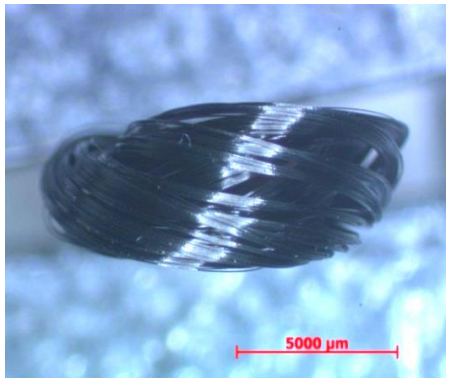
J_C (7 Тл; 1,9 К) = 2800 А/мм²

Уникальный NbTi провод для детектора CBM ускорителя FAIR

ВНИИНМ
РОСАТОМ



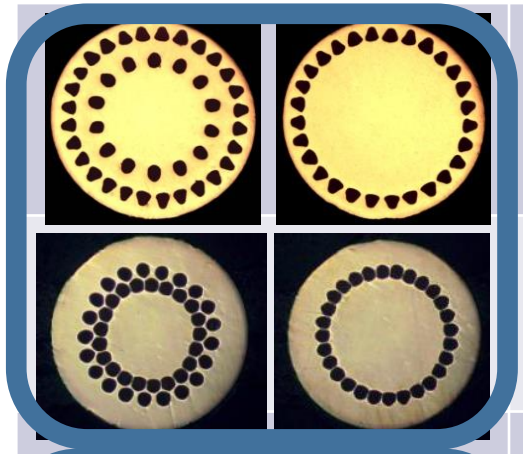
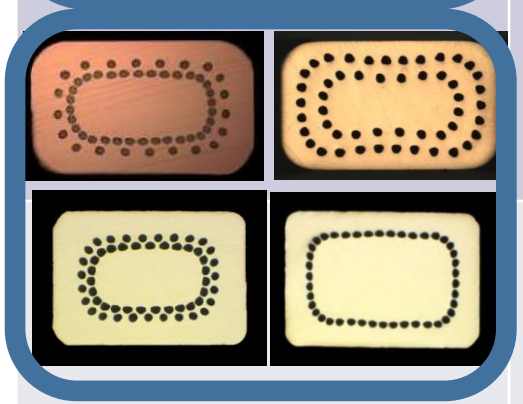




Параметр	Первоначальные требования: стренд CMS + шина из Cu	Уточненные требования провод АО «ВНИИНМ»
Дизайн катушки	односекционная	двухсекционная
Высота, мм	2,02	2,02
Ширина, мм	3,25	3,25
Диаметр вставки, мм	(1,28±0,005)	-
Отношение Cu/NbTi (вставка)	(1,1±0,1)	-
Отношение Cu/NbTi (провод)	(9,1±0,5)	$7{,}4_{-0{,}1}$
Диаметр волокна, мкм	< 40	< 40
Шаг скрутки, мм	< 45	< 45
Плотность критического тока (4,2 К; 5 Тл), А/мм^2	3000	3000
Критический ток (4,2 К; 5 Тл), А	≥ 1754	≥ 2270
RRR	> 100	> 180
Длина куска, км	8,75	5,0
Количество кусков, шт.	2	4

ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОВОДА, РАЗРАБОТАННЫЕ АО «ВНИИНМ»

ТВЭЛ
РОСАТОМ

Конструкция	Количество волокон, размер	Критические токи
	*Диаметр провода 1,345 мм* *Количество волокон 42 (28)* *Cu/non Cu 3,8 (6,0)*	*42 волокна: Ic > 820 A (5Тл) S≤5%* *28 волокон: Ic > 650 A (4Тл) S≤5%* *(монолитный вариант – «экструзия»)*
	Диаметр провода 1,345 мм *Количество волокон 42 (28)* *Cu/non Cu 3,8 (6,0)*	*42 волокна: Ic = 880 A (4Тл) S<3%* *28 волокон: Ic = 700 A (5Тл) S<3%* *(монолитный вариант – способ «холодной сборки»)*
	*Размер провода 1,35x2,25 мм* *Приведенный диаметр 1,9 мм* *Количество волокон 54* *Cu/non Cu 7,5*	*54 волокна: Ic = 1070A (5Тл) S<3%* *(монолитный вариант – способ «холодной сборки»)* *54 волокна: Ic > 900 A (5Тл); S≤5%* *(монолитный вариант – «экструзия")*
	Размер провода 1,5x2,25 мм *Приведенный диаметр 2,1 мм* *Количество волокон 54 (42)* *Cu/non Cu 7,0 (12,0)*	*54 волокна: Ic >1400 A (4Тл) S<3%* *42 волокна: Ic >1000 A (4Тл) S<3%* *(монолитный вариант – способ «холодной сборки»)*

Стоимость: 60-70 USD /кг

Высокотемпературные сверхпроводники второго (ВТСП-2) поколения

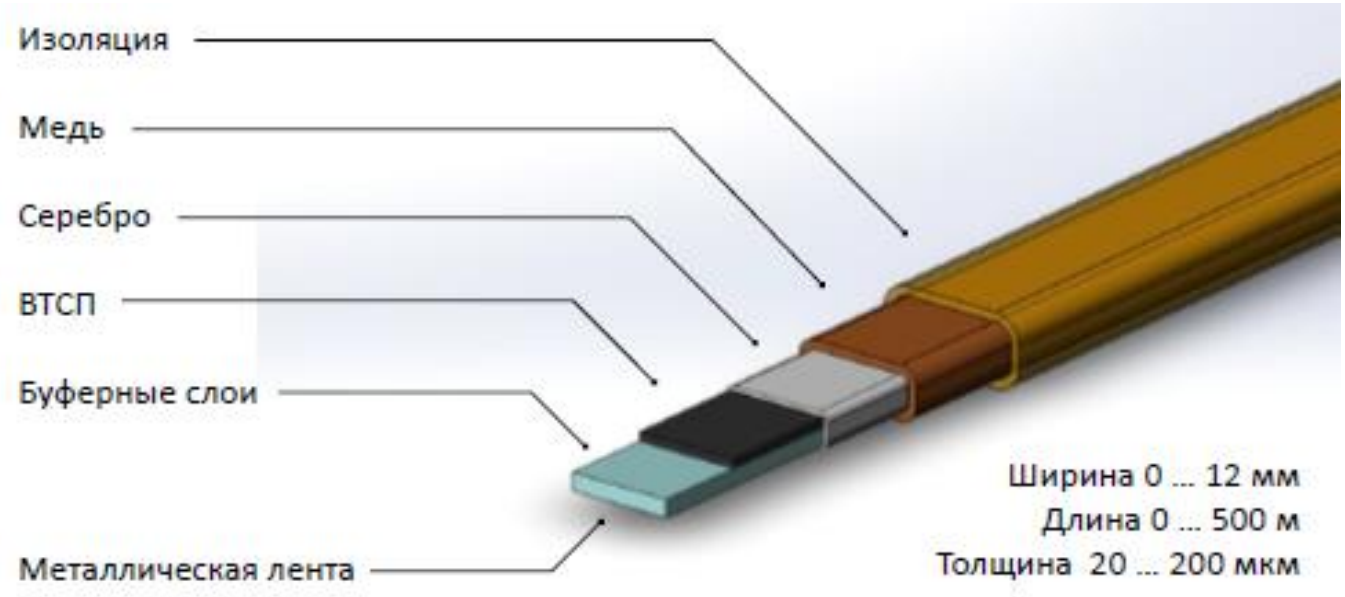
Области применения ВТСП-2 лент

4,2 К, высокие магнитные поля

- Ускорители
- Токамаки
- Исследовательские криомагниты
- И т.д.

77 К, собст. маг. поле

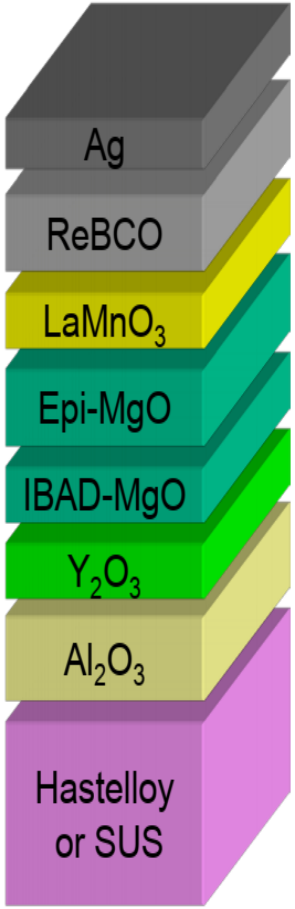
- Электрокабели
- Накопители энергии
- Ветрогенераторы
- И т.д.



Основные компании

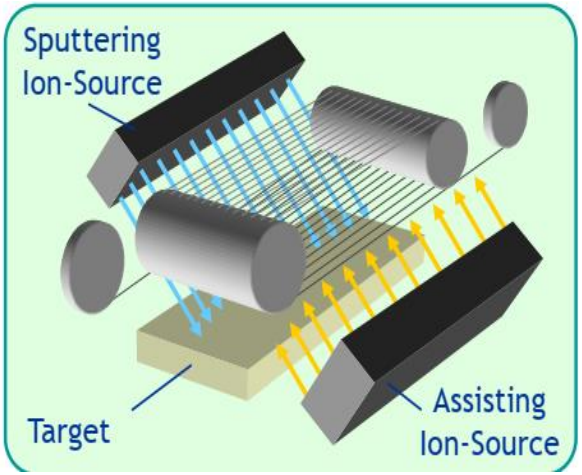
Компания	Материал ленты-подложки	Технология буф. слоев	Технология ВТСП слоя
Superpower (США)	Hastelloy C276	Al_2O_3-Y_2O_3-MgO (IBAD)-MgO-CeO_2	MOCVD
Fujikura (Япония)	Hastelloy C276	Al_2O_3-Y_2O_3-MgO (IBAD)-MgO-CeO_2	PLD
Sunam (Корея)	Hastelloy C276	Al_2O_3-Y_2O_3-MgO (IBAD)-MgO-CeO_2	RCE (e-beam) + DR
Суперокс (Россия)	Hastelloy C276	Al_2O_3-Y_2O_3-MgO (IBAD)-MgO-$LaMnO_3$	PLD
Theva (Германия)	Hastelloy C276	MgO (ISD (inclined surface deposition))-MgO	e-beam
Bruker (Германия)	AISI 310S	YSZ (ABAD)-CeO_2	PLD

Технологии буферных слоев



Полная архитектура слоев ВТСП-2

IBAD - MgO

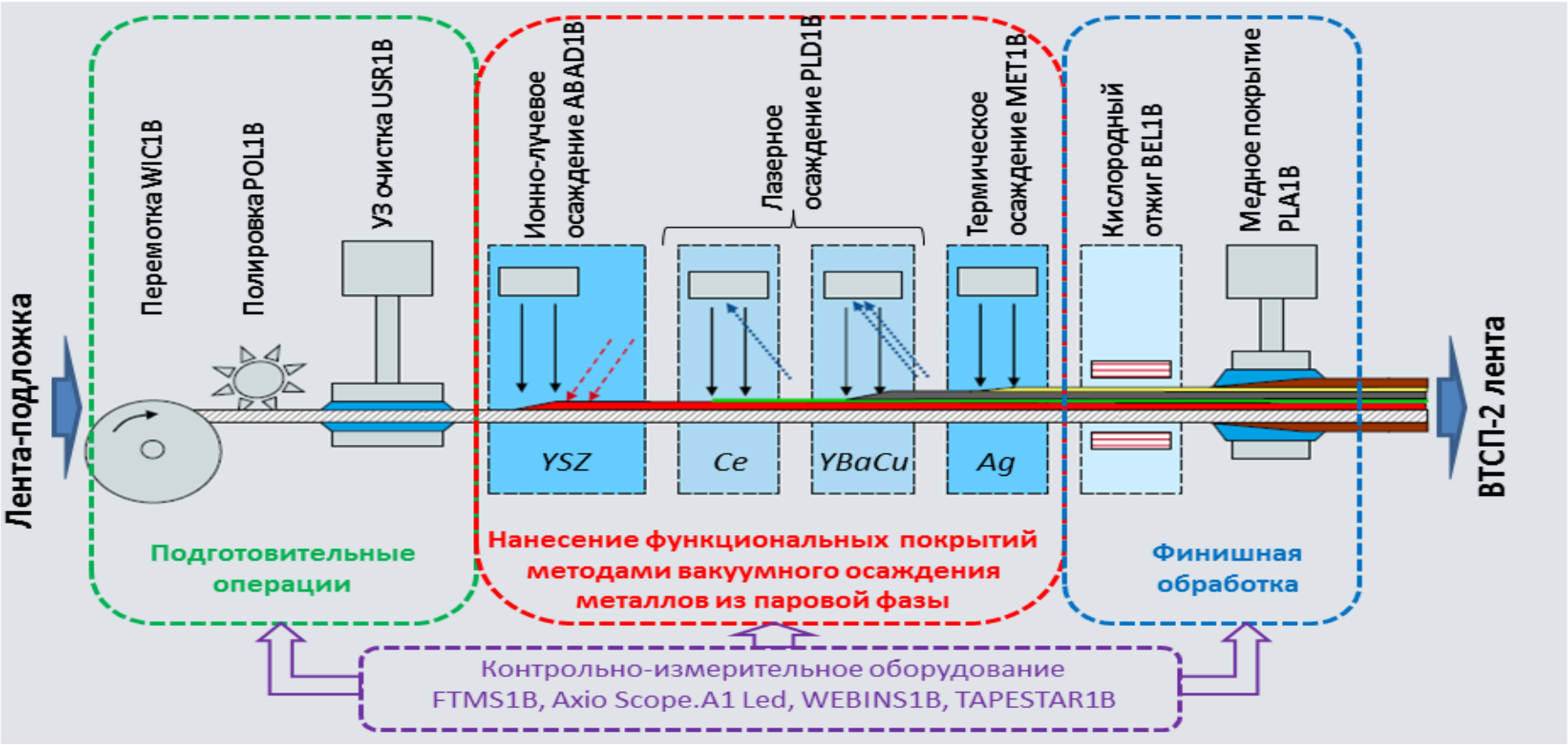


1 Полированная подложка, шероховатость поверхности ~0,5 – 1 нм
2-3 Планаризирующие слои Al_2O_3 и Y_2O_3 (реактивное магнетронное напыление)
4 IBAD - MgO толщиной 7 – 10 нм (быстро)
Режим на проход
5 MgO эпитаксиальный – термическое испарение
6-7 $LaMnO_3$ и/или CeO_2 – PLD или термическое испарение

ABAD - YSZ

1 Полированная подложка, шероховатость поверхности ~2 нм
2 IBAD - YSZ толщиной 2 мкм (около 1000 проходов)
намотка на вращающийся барабан
3 CeO_2 – PLD или термическое испарение

Схема процесса изготовления высокотемпературных сверхпроводников второго поколения



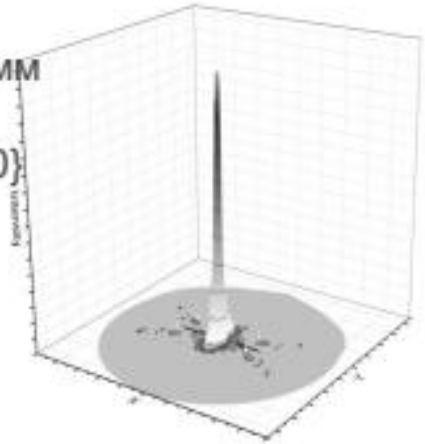
Текстурированные ленты - подложки

Текстурированные подложки на основе сплавов Ni-W:

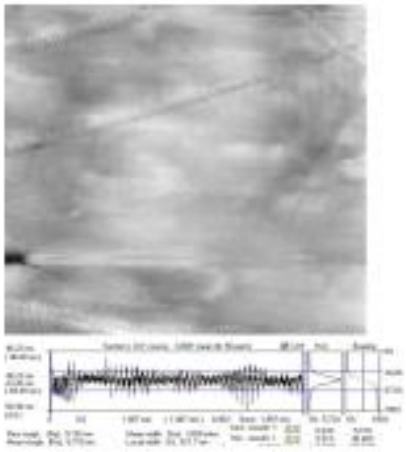
- Ni – 5 - 6 at.% W (стандартная подложка)
- Ni – 7 – 7.5 at.% W (low magnetic susceptibility)
- Ni – 9 at.%W (парамагнитная подложка)
- Композитная 3-слойная подложка – Ni – 6 at.W + Нерж.ст. (Объемное отношение Ni-W/SS = 2:3)

Свойства текстурированных подложек:

- Ширина 10 или 12 мм, толщина 0,06 – 0,1 мм
- Длина до 200 м
- Доля кубической текстуры ориентации {100} – не менее 97 % (99%)
- Шероховатость поверхности – Ra ≤ 10 нм
- Saturation magnetization values at 77 K:
  - Ni - 5 – 6% W – 20 emu/g
  - Ni – 7 – 7.5% W – 10 emu/g
  - Composite - 8 emu/g
  - Ni – 9% W – 0 emu/g



Полюсная фигура {100} ленты Ni-9%W

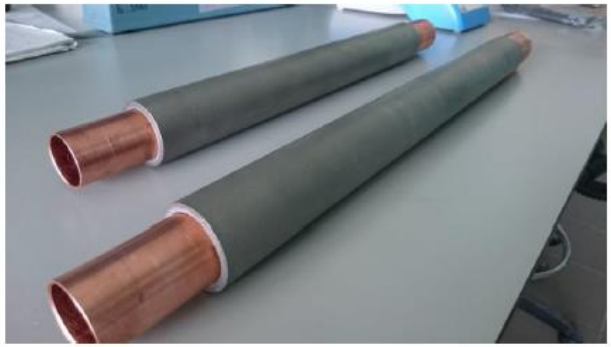


AFM image of the Ni-W tapes surface (50 x 50 μm^2 area). Ra=7 nm

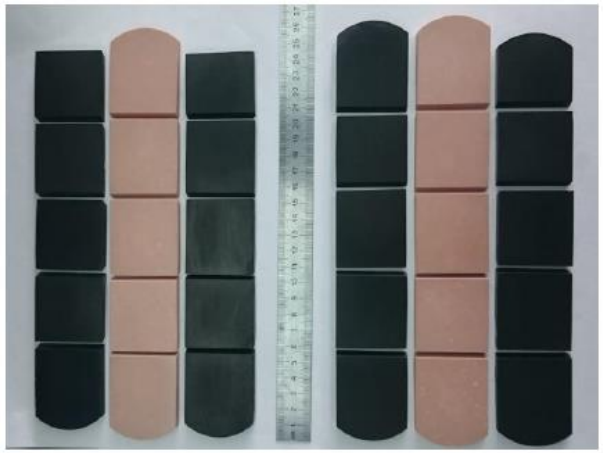
Керамические и металлические мишени

Химический состав сплава Zr-Y: – 15 ат.%Y
Мишени могут быть пластинчатые и трубчатые

Пластинчатая мишень из сплава 410x100x8 мм. Снизу припаяна медная пластина



Трубчатые мишени длиной 400 и 500 мм, внешний диаметр 50 мм, толщина слоя Zr-Y 5 мм



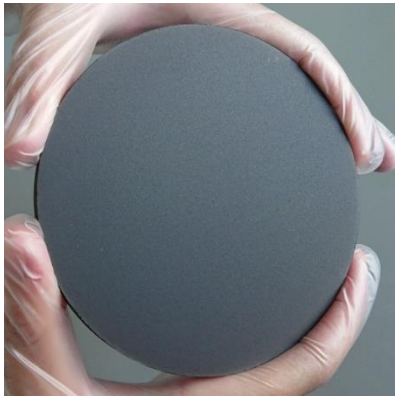
Комплекты мишеней Y-123 и CeO_2

Удельная плотность: **95–90 % от теоретической**

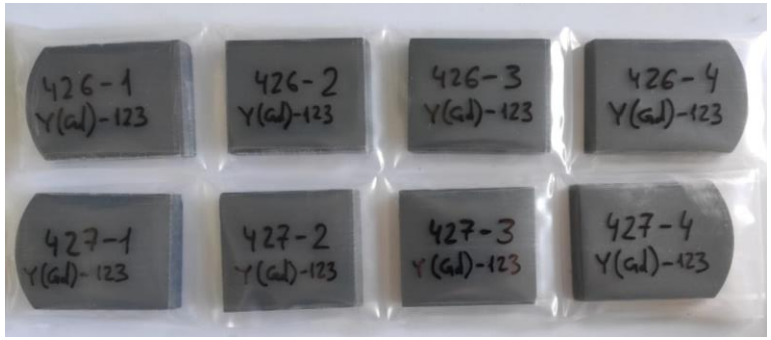
YSZ мишени

Y_2O_3 мишени

Керамические мишени



Мишень Y/Eu-123

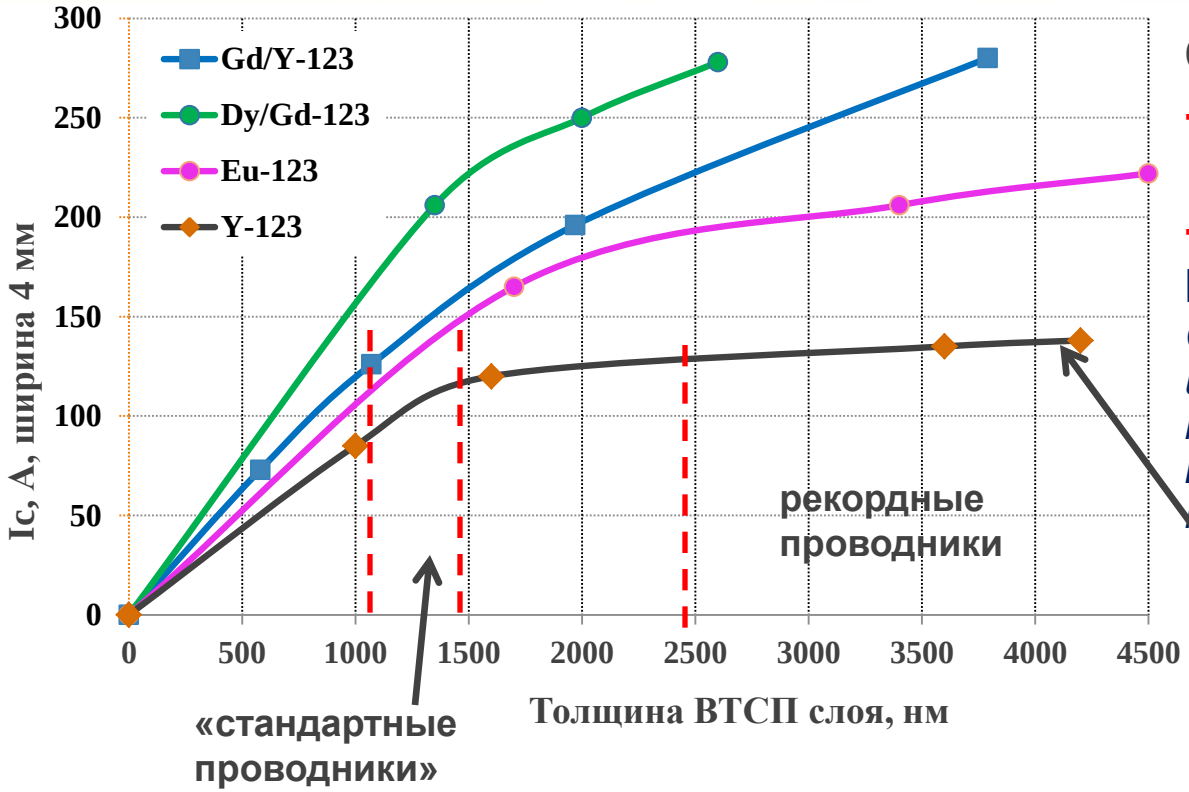


Составная мишень Y/Gd-123

Мишень Gd-123
+ 5%мас. $BaHfO_3$

Порошки-прекурсоры для изготовления керамических мишеней

Основные результаты



Оптимальные составы

- для 77 К

Dy/Gd – 123, Gd/Y – 123

- для 65 К – Dy/Gd-123, Eu/Y-123

Состав Gd/Y уже получил широкое распространение в мире.

Dy/Gd - в литературе сведений нет

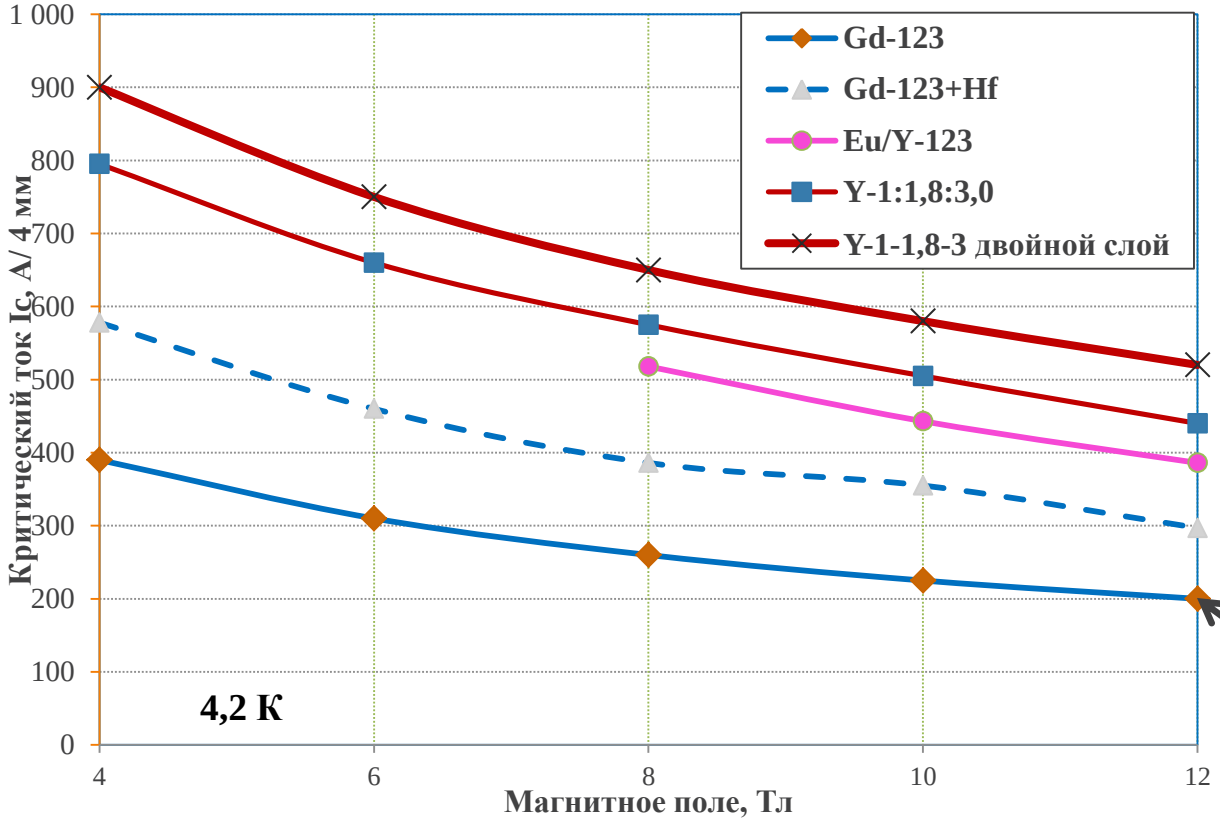
Уровень свойств до начала работы (2018 г.)

Изготовлены и исследованы свойства проводников Sm, Gd, Eu, Dy-123, а также смешанные состав R/Y-123 при 77 К. Оптимизация состава позволила повысить свойства проводников более чем в 2 раза.

Установлено, что наилучший эффект получается при смешении различных РЗЭ. Лучший найденный состав для 77 К – Dy/Gd-123.

Значения Ic = 280 А / 4 мм не уступают лучшим мировым образцам.

Основные результаты



Оптимальный состав для 4,2 К Y-123 нестехиометр (1,0-1,8-3,0)

Интерес представляют составы:
- **Y-123 с различными соотношениями Y:Ba:Cu**
- **Eu/Y-123**
- **Добавки $BaHfO_3$ не более 2 мольн.%**

Исходный уровень 2018 г.

Удалось увеличить токонесущую способность проводников при 4,2 К в поле 12 Тл почти в 2,5 раза.

Что получено на мишенях АО «ВНИИНМ»

Достигнутые КИ свойства на мишенях АО «ВНИИНМ» в рамках ЕОТП-СП-130

Использовались подложки НИЦ КИ: нерж сталь/ YZS/ CeO2 шириной 4 мм

Значения I_c при **77 К** (собственное магнитное поле) (состав ВТСП (Gd+R)-123:
-«стандартный проводник» - > 200 А (толщина ВТСП 1,3 мкм)
- рекордный проводник - 280 А (толщина ВТСП 2,5 мкм)

Значения I_c при **4,2 К** поле **12 Тл** (направление поля перпендикулярно плоскости ленты) (состав ВТСП Y-123 нестехиометрический):
- стандартный проводник 450 А (толщина ВТСП 1,3 мкм)
- рекорд 520 А (толщина ВТСП 2,5 мкм)

Новые сверхпроводники на основе пниктидов и диборида магния

Состояние разработок в мире по пниктидам

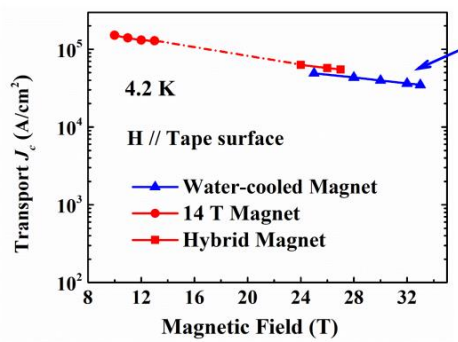
ТВЭЛ
РОСАТОМ

New record J_e 364A/mm² @ 4.2K, 10T

Short sample *I_c: 437 A with 4-mm width and 0.3-mm thickness.*

J_e = 364A/mm² @ 4.2K, 10T

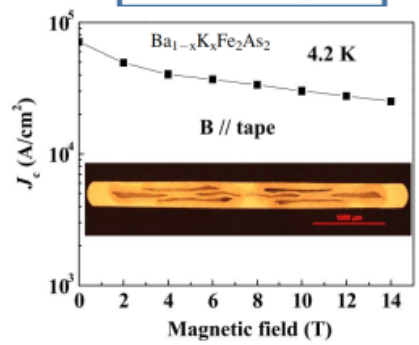
IEECAS
Yanwei Ma



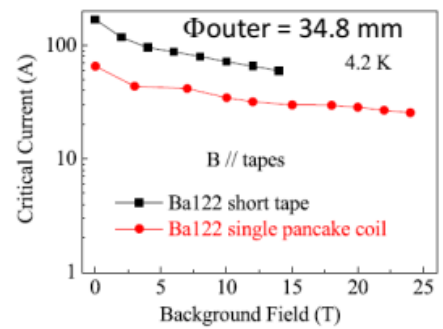
At 30 T, J_c = 400 A/mm²

Transport J_c of 100-m-class 7-filamentary Ba-122 IBS tapes was further improved to > 3×10⁴ A/cm² at 10 T & 4.2 K (three times the value in 2016).

Y. Ma, D. Wang et al



Fabrication of IBS solenoid coil and test at 24T



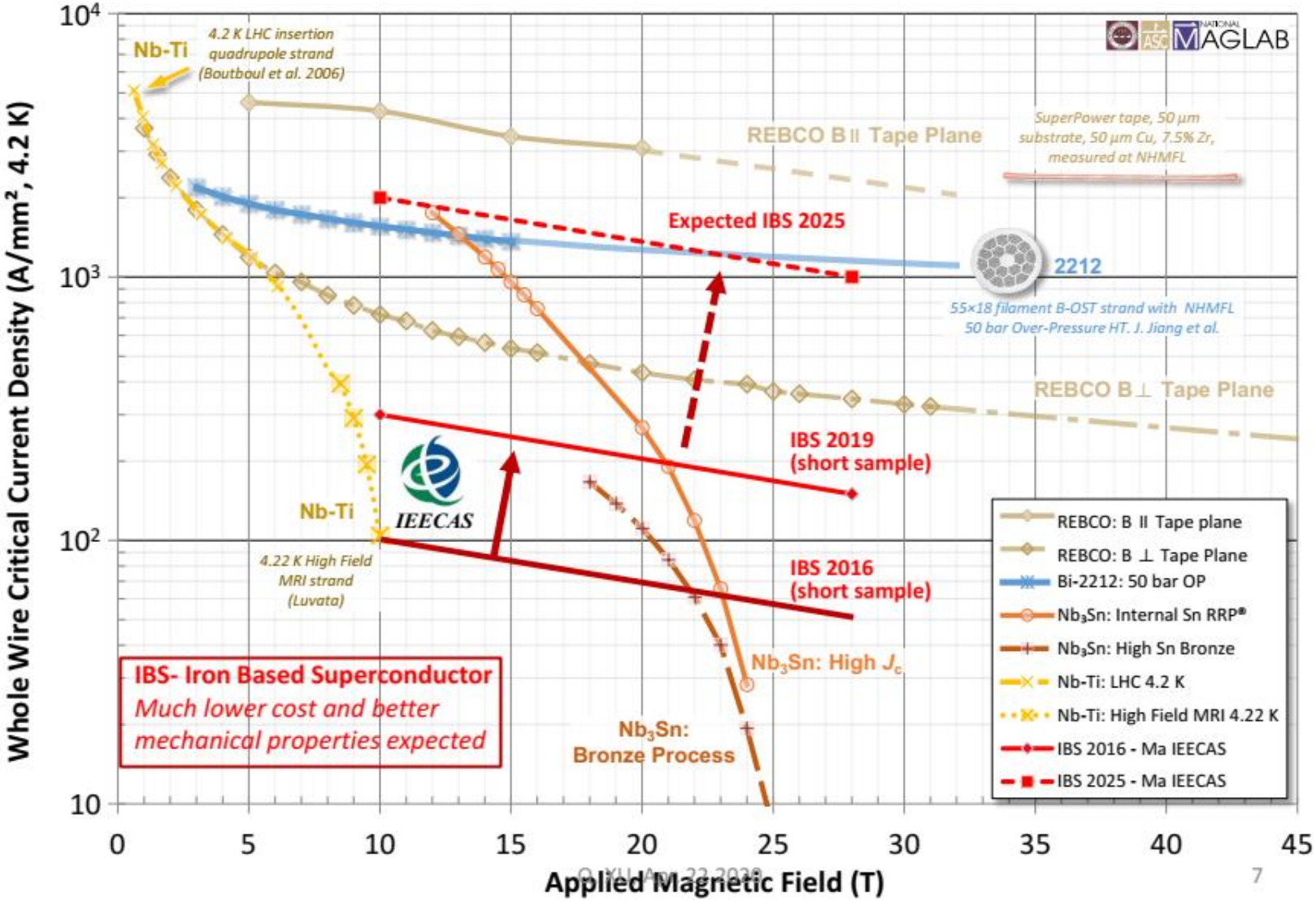
Viewpoint by NHMFL

'From a practical point of view, **IBS are ideal candidates for applications**. Indeed, some of them have quite a **high critical current density, even in strong magnetic fields**, and a low superconducting anisotropy.

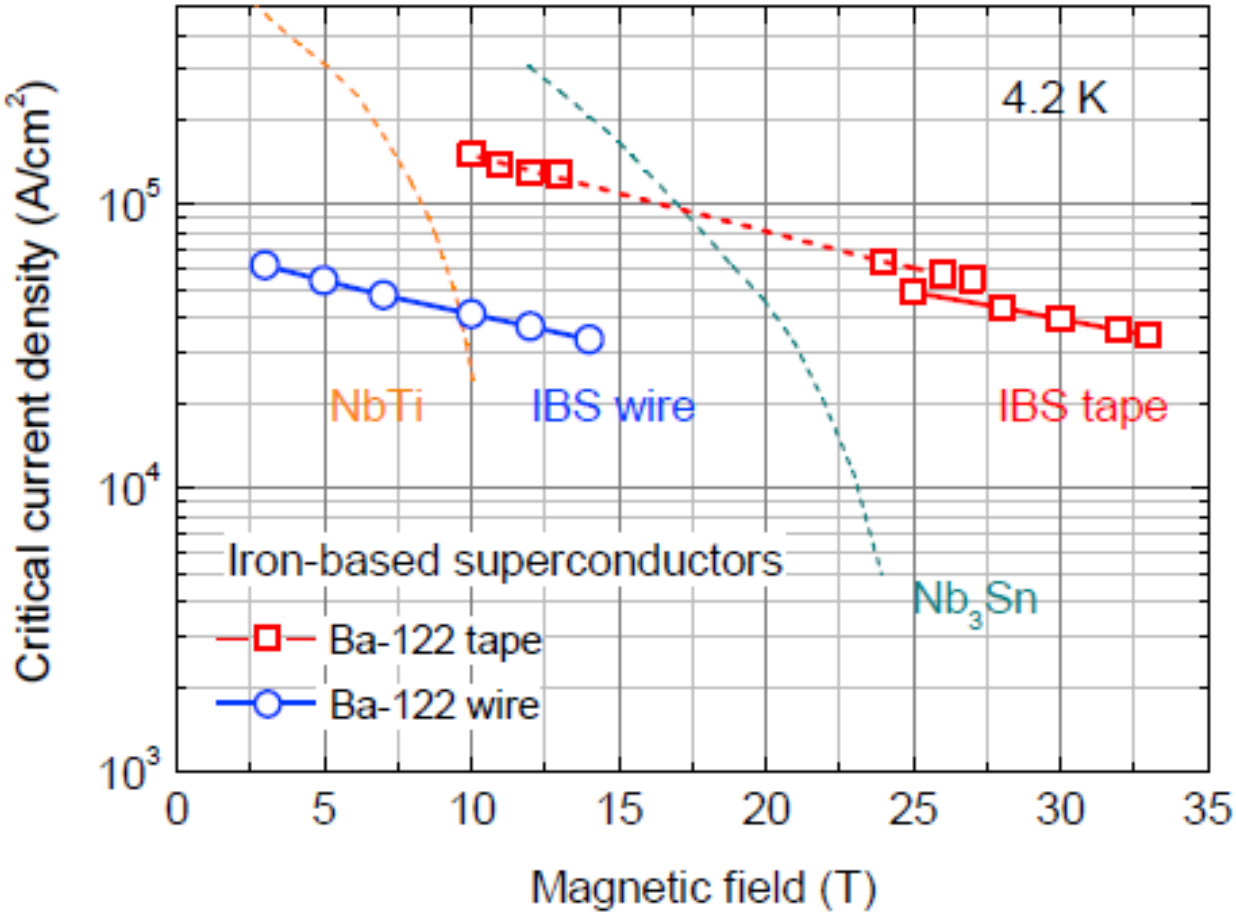
Moreover, **the cost of IBS wire can be four to five times lower than that of Nb_3Sn**……

Стоимость сверхпроводников на основе железосодержащих соединений может быть в 4-5 раз ниже, чем у Nb_3Sn сверхпроводников

Состояние разработок в мире по пниктидам (IBS)



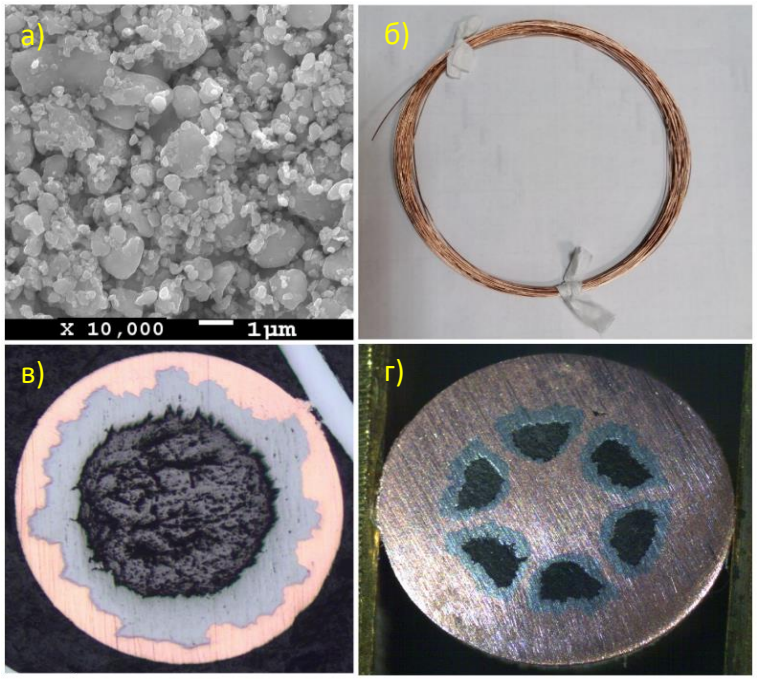
Состояние разработок в мире по пниктидам (IBS)

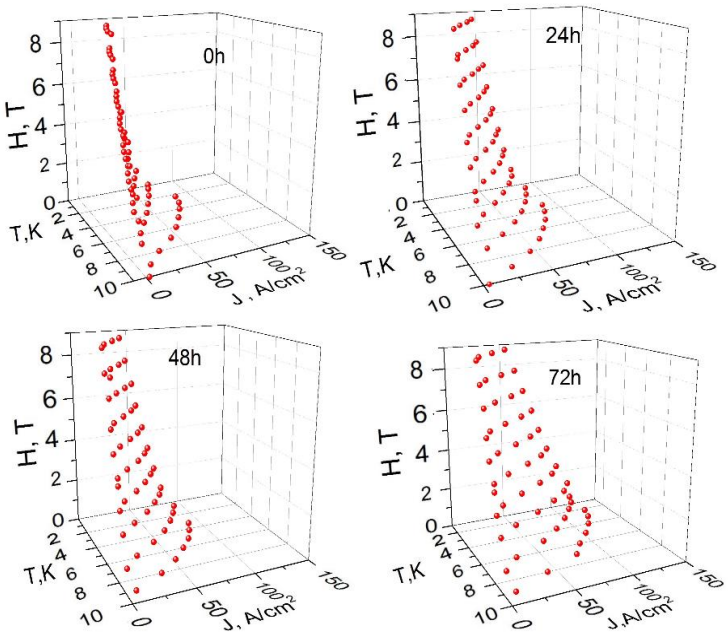


Состояние разработок в России

ТВЭЛ
РОСАТОМ

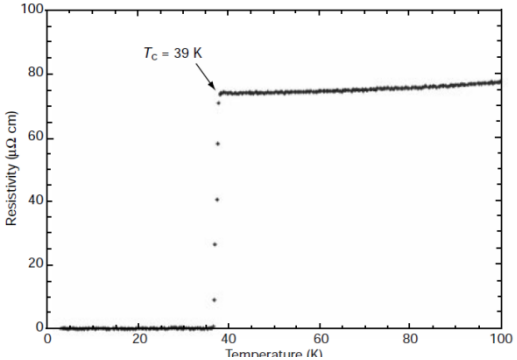
- Специалисты **АО «ВНИИНМ»** совместно с **ФИАН им. П.Н. Лебедева** впервые в России изготовлены сверхпроводниковые провода и ленты на основе модельного железосодержащего сверхпроводника FeSe с помощью различных модификаций метода «порошок в трубе» (англ. «powder-in-tube», PIT). Показана возможность изготовления длинномерных проводов из сверхпроводников на основе железа.
- Синтезированы новые сверхпроводящие материалы с рекордно высоким критическим магнитным полем до 200 Тл.

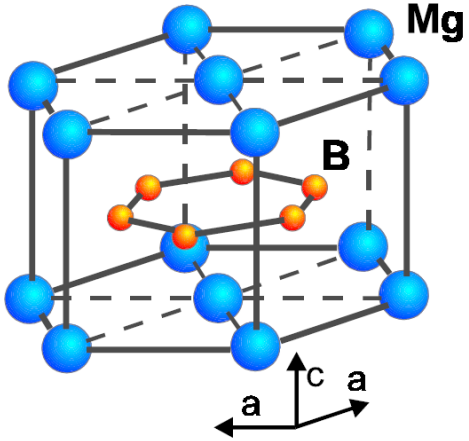




Сверхпроводники на основе MgB_2

2001г. открытие сверхпроводимости





a = 0,3086 нм
b = 0,3524 нм

Характеристики MgB_2

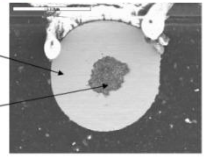
Характеристика	Величина
Критическая температура	39-40 К
Верхнее критическое поле	// ab (0)=14÷39 Тл //c(0) = 2÷24 тл
Нижнее критическое поле при 0 К	27÷48млТл
Поле обратимости	6÷35 Тл
Плотность критического тока	Jc (4,2К, 0Тл)> 10^7 А/см^2 Jc (4,2К, 4Тл) = 10^6 А/см^2 Jc (4,2К, 10Тл)> 10^5 А/см^2 Jc (25К, 0Тл)=$5\cdot10^6$ А/см^2 Jc (25К, 2Тл)> 10^5 А/см^2

Review of superconducting properties of MgB_2, C. Buzea, T. Yamashita, 2001, Science&Technology

Superconductivity at 39 K in magnesium diboride, J. Nagamatsu, J. Akimitsu et al, March 2001, Nature

Применение сверхпроводников на основе MgB_2

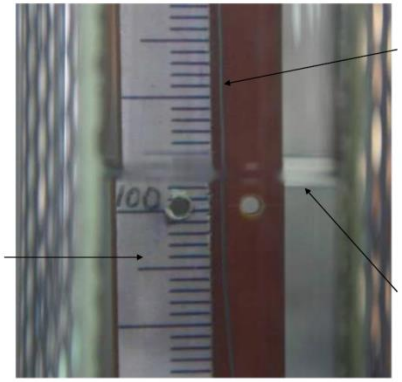
MgB_2 Level Sensor (3)

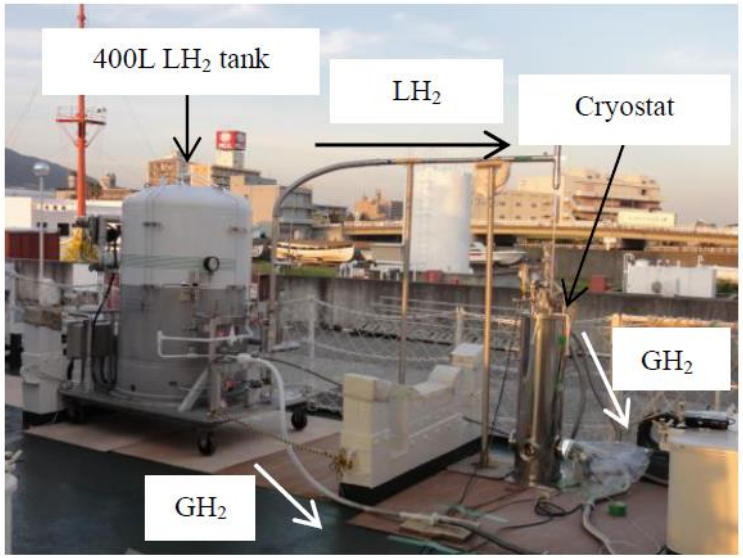


MgB_2 wires with SiC impurities
In situ method
600°C × 1 h

Sample	Additive	Diameter [mm]	$T_{C,ON}$ [K]	ΔT_C [K]
D-2	None	0.65	35.4	1.6
E-4	10 % SiC	0.32	33.0	3.0
E-5	10 % SiC	0.32	31.5	3.7

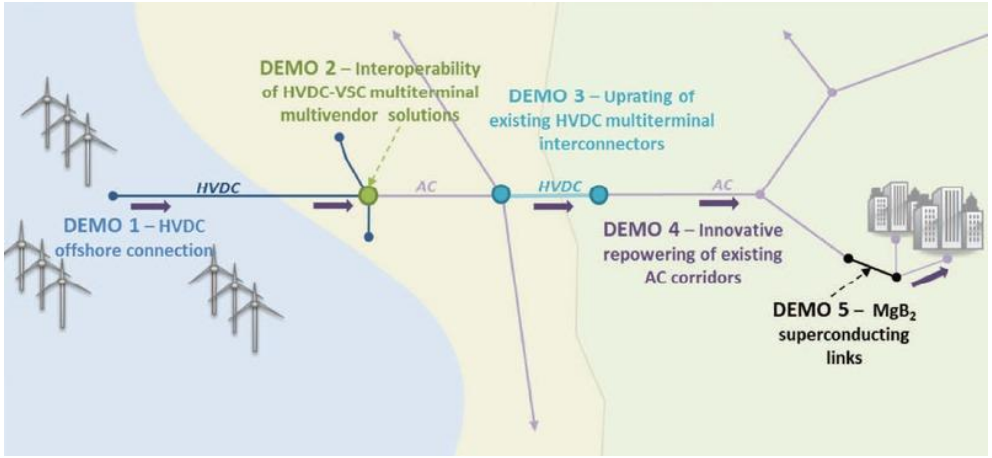
MgB_2 Sensor and Scale in LH_2 (25 K)

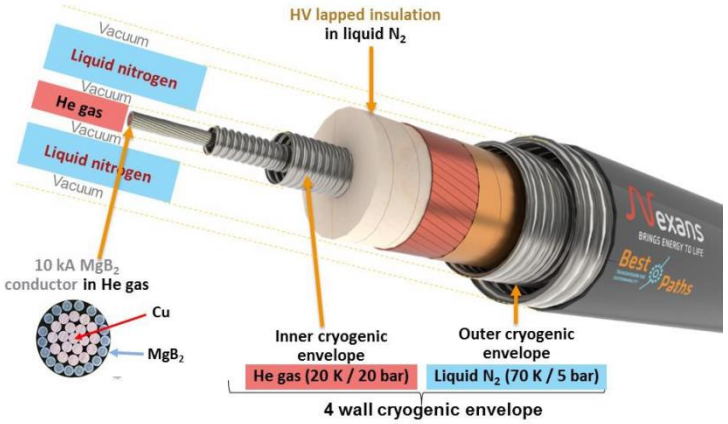




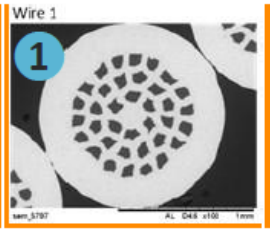
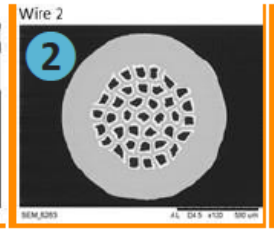
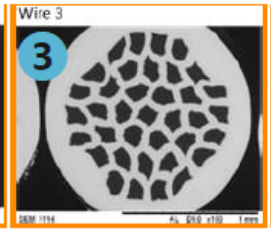
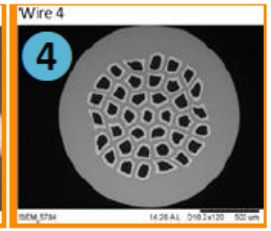
Kazuma Maekawa et al. / Physics Procedia 67 (2015) 1164 – 1168

Применение сверхпроводников на основе MgB_2



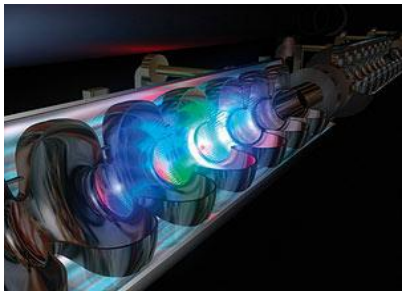


Характеристики используемых сверхпроводников (производство Columbus Superconductors)

MgB_2 wires	Wire 1 	Wire 2 	Wire 3 	Wire 4 
Diameter (mm)	1,3	1,0	1,5	1,5
Materials	Monel, Ni	Monel, Ni, Nb	Monel, Ni	Monel, Ni, Nb
MgB_2 volume fraction	17 %	12 %	30 %	12 %
I_c (A) @ 20 K & 1 T	500	300	> 650	> 650
I_c (A) @ 4,2 K & 3 T	280	400	> 700	600
r_c (mm)	125	100	200	150

MgB_2 round wires for the high power superconducting cable demonstrator in Best Paths project, EUCAS 2017, M. Tropeano

Резонаторный ниобий



ТВЭЛ
РОСАТОМ

Сверхпроводящие резонаторы на основе высокочистого ниобия являются основными элементами ускорителей. Наиболее крупные проекты: FCC, CEPC, ILC, ESS, MIRRHA и др.

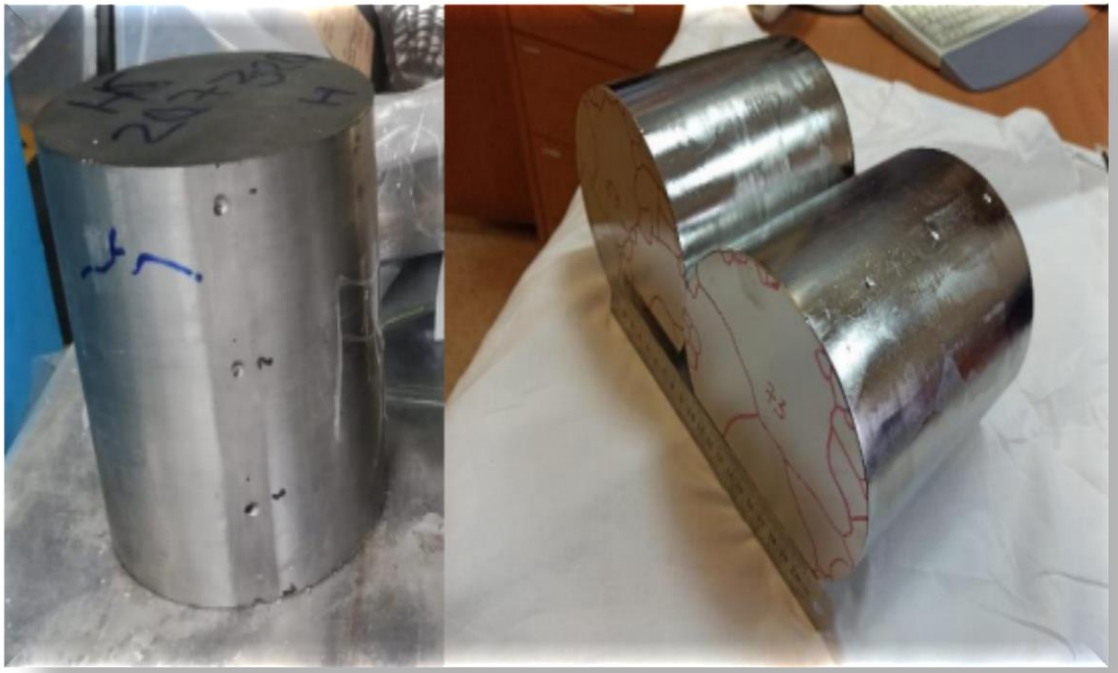
Общую потребность в резонаторном ниобии только для нескольких новых крупных ускорителей (CEPC, FCC, ILC) можно оценить на уровне более **3500 тонн** (только для ILC требуется 20000 резонаторов).

К настоящему моменту из Европейского Центра Ядерных Исследований (ЦЕРН, г. Женева, Швейцария) и ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск) в АО «ВНИИНМ» поступили обращения о возможности поставки пилотных тестовых партий ниобиевых листов для резонаторов толщиной от 2 до 4 мм с величиной параметра RRR 200-300 и выше.

Освоение технологии изготовления ниобиевых листов для сверхпроводящих резонаторов является крайне актуальной задачей и выводит ГК «Росатом» на новые рынки в качестве поставщика высокотехнологичной наукоемкой продукции.

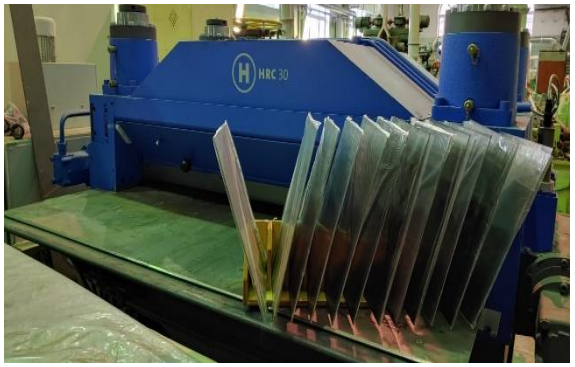
Резонаторный ниобий

- В рамках проекта в 2019-2022 гг. по режимам, разработанным в АО «ВНИИНМ» в АО ЧМЗ было выплавлено более **1 тонны** слитков высокочистого ниобия.
- На слитках удалось достичь сниженного содержания газовых примесей (O, C, N, H) до 40 ppm, твердости до 40-45 HB и параметра RRR более 400.



Резонаторный ниобий

- Из слитков высокочистого ниобия получены листы ниобия толщиной 2 мм и размерами 200х300 мм.
- На листах высокочистого ниобия удалось достичь параметра RRR более 300, сформировать полностью рекристаллизованную структуру со средним размером зерна менее 45 мкм, твердостью менее 60 HV, механическим характеристикам при растяжении σ_B более 140 МПа, $\sigma_{0,2}$ в пределах 65-100 МПа, δ более 30 %



Спасибо за внимание

Абдюханов Ильдар Мансурович
Заместитель генерального директора – директор отделения

Тел.: +7 (499) 190 89 99, доб. 81-14
E-mail: IMAbdyukhanov@bochvar.ru
www.bochvar.ru