

## Сверхпроводящие материалы на основе ВТСП: технология, свойства, перспективы применения

И.И. Акимов, А.Е. Воробьева, В.И. Панцырный, А.К. Шиков  
ГНЦ РФ Всероссийский институт неорганических материалов, Москва, Россия

Представлен краткий обзор современного состояния разработок в области технических сверхпроводящих материалов на основе высокотемпературных сверхпроводящих соединений за рубежом и в России. Приведены примеры применения отечественных ВТСП-материалов при создании моделей электротехнических устройств.

### Введение

Открытие в середине 80-х годов XX века оксидных керамических сверхпроводящих соединений с критической температурой сверхпроводящего перехода выше 77 К (ВТСП) позволило резко расширить возможные области применения явления сверхпроводимости и в перспективе ожидать резкого сокращения затрат на создание и эксплуатацию криогенных энергетических и электротехнических систем. В ряде зарубежных и российских публикаций высокотемпературная сверхпроводимость рассматривается как основа электротехнических технологий XXI века, а высокотемпературные сверхпроводники – как основной материал для создания высокоэффективного современного электроэнергетического и электротехнического оборудования. По прогнозам ведущих зарубежных и отечественных специалистов, объем рынка сверхпроводящих материалов и изделий на их основе составит в ближайшие годы десятки млрд. долларов США в год (табл.1).

**Таблица 1.**

**Прогнозы рынка использования электротехнического оборудования на основе ВТСП [1-5].**

Отрасли техники – потенциальные потребители ВТСП	Объем потребления ВТСП- систем за рубежом (прогноз 2010 г.)
Термоядерная энергетика	14 млрд. долларов
Индустриальная физика	
Электроэнергетика	
Электроника	7 млрд. долларов
Транспорт	0,5 млрд. долларов
Горно-обогатительная промышленность	0,1 млрд. долларов
Авиационно-космическая техника	Данные отсутствуют
Медицина	16 млрд. долларов
Военная техника	Данные отсутствуют

К 2000 г. в развитых зарубежных странах (США, Европа, Япония) закончен этап НИОКР, заключающийся в разработке технологий изготовления технических сверхпроводников на основе ВТСП и их опробовании при создании ряда устройств криогенной электротехники – силовых кабелей, токовводов, токоограничителей, трансформаторов, двигателей и генераторов, магнитных систем и пр. В настоящее время (табл. 2) в ряде ведущих зарубежных фирм (ASC, США; NST, Дания; VAC, Германия; Sumitomo, Furukawa, Hitachi, Япония) объем выпуска ВТСП-проводников составляет до 500 км в год; активно реализуются проекты по строительству промышленных предприятий с объемом выпуска до 10000 км в год (ASC, США). При этом объем инвестиций в разработку таких технологий, в частности в США, составляет до 300 млн. долларов в год [6].

Таблица 2.

## Основные производители ВТСП-материалов.

Производители ВТСП-проводников	Производственные мощности	Потребители
<b>США:</b> “American Superconductor Co.”	1997 г. - <b>157 км</b> 1999 г. - <b>370 км</b> 2001 г. (план) - <b>1600 км</b>	Министерство энергетики, ВМФ, NASA, Авиационно-космические фирмы
“Intermagnetic General Co.”	2000 г. (план) - <b>100 км</b>	
<b>Дания:</b> “Nordic Superconductor Tech.”	<b>100 км</b> в год	Линии электропередачи
<b>Германия:</b> “Siemens”	<b>100 км</b> в год	Кабели, трансформаторы
<b>Англия:</b> “BICC Cables”	<b>200 км</b> в год	Токовводы, токоограничители, трансформаторы, соленоиды
<b>Австралия:</b> “Australian Superconductor”	<b>70 км</b> в год	Токоограничители, соленоиды, трансформаторы
<b>Япония:</b> “Sumitomo”	<b>200 км</b> в год	Токовводы, кабели, токоограничители
“Hitachi”	<b>200 км</b> в год	
“Furukawa”	<b>200 км</b> в год	

Достигнутые к настоящему времени технические характеристики ВТСП-материалов позволяют обеспечить существенное повышение технической и экономической эффективности эксплуатации электро-технических устройств при повышении уровня экологической безопасности.

Разработки в области технических ВТСП-проводников проводятся и в России, в ГНЦ РФ ВНИИНМ, уровень свойств отечественных материалов не уступает зарубежному, а по ряду показателей превосходит его. В ГНЦ РФ ВНИИНМ в результате комплекса НИОКР при поддержке Минатома РФ созданы основы технологии изготовления длинномерных композиционных ВТСП-проводников, листовых композиционных ВТСП-материалов и массивной сверхпроводящей керамики, разработки защищены патентами РФ.

В настоящем весьма кратком обзоре представлены некоторые особенности технологии и характеристики главным образом композиционных сверхпроводников на основе ВТСП-системы висмут-свинце-стронций-кальций-медь-кислород, а их использование в технике иллюстрируется на примере разработок ГНЦ РФ ВНИИНМ, выполненных в сотрудничестве с рядом российских организаций.

### Технология изготовления и характеристики технических ВТСП-проводников

К настоящему времени наиболее технически отработанным и легко масштабируемым методом изготовления длинномерных композиционных ВТСП-проводников является так называемый метод «порошок-в-трубе» (рис.1), который позволяет использовать в технологическом процессе набор стандартного оборудования (в частности, для обработки давлением), легко варьировать конструкции проводников для различных применений, и что не маловажно, позволяет получать сверхпроводники практически неограниченной длины (несколько километров в единичном куске).

Наибольшие успехи в использовании этого метода достигнуты применительно к получению сверхпроводников на основе сверхпроводящего соединения  $(\text{Bi,Pb})_2\text{-Sr}_2\text{-Ca}_2\text{-Cu}_3\text{-O}_{10-\delta}$  (Bi-2223), которое на начальном этапе технологии применяется в виде порошка – полуфабриката. Особенности морфологии частиц этого соединения и механизм фазообразования при термообработке композиционных сверхпроводников обуславливают то обстоятельство, что высокая токонесущая способность, как правило, достигается в проводниках ленточной формы. При этом такие проводники могут содержать до 10000 сверхпроводящих керамических жил в металлической матрице (как правило, из серебра или из его сплавов).

**Схема изготовления многожильных ленточных проводников методом «порошок в трубе»**

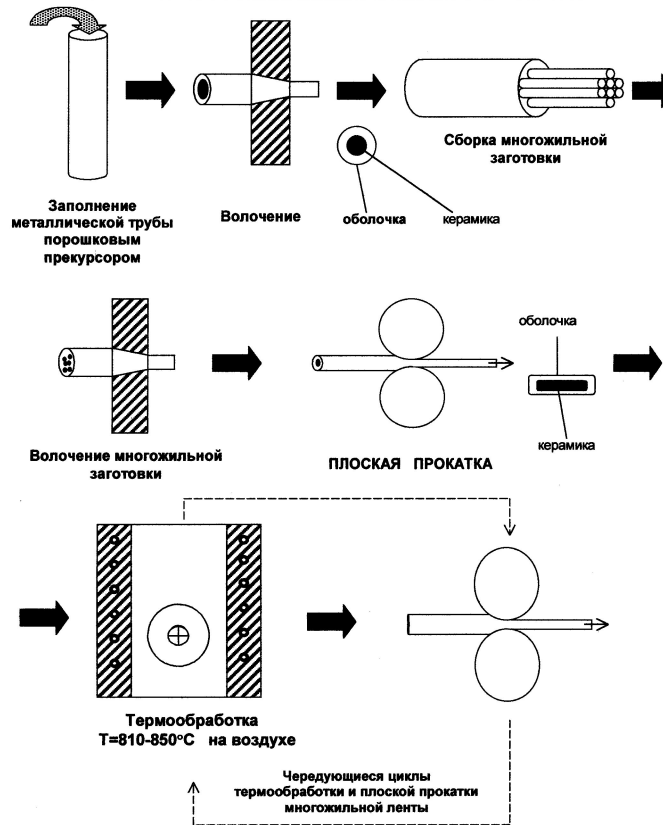


Рис. 1. Схема метода «порошок-в-трубе».

Некоторые конструкции таких проводников, изготовленных в ГНЦ РФ ВНИИНМ, представлены на рис. 2.

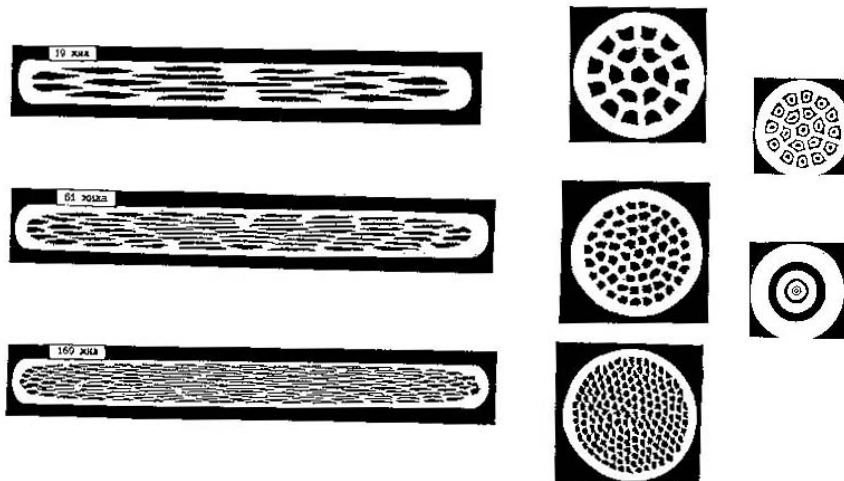


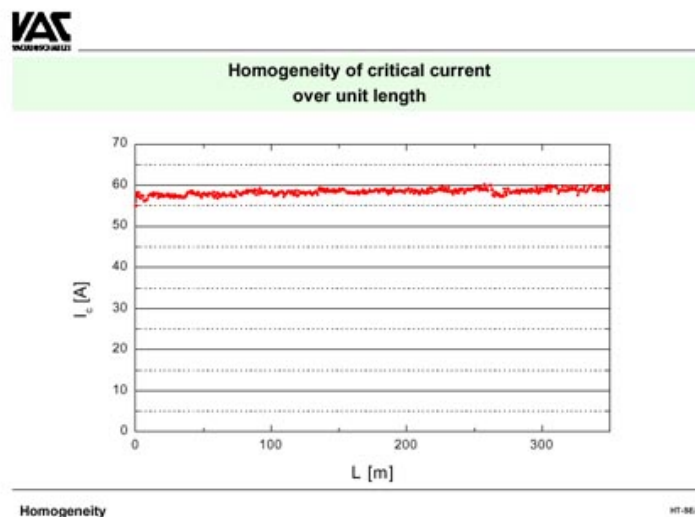
Рис. 2. Поперечные сечения ВТСП композиционных проводников, изготовленных в ГНЦ РФ ВНИИНМ. Поперечные сечения лент (0,2-0,25)х(3,0-3,5) мм<sup>2</sup>; диаметры круглых проводников 0,8-1,0 мм; критическая плотность тока до 3х10<sup>4</sup> А/см<sup>2</sup> (77 К, 0 Тл); критическая температура перехода до 108 К.

В Европе в настоящее время лидирующее место в производстве таких материалов занимает фирма *Vacuumschmelze* (Германия), тесно сотрудничающая в этой области с фирмой *Nordic Superconductor Technologies* (Дания). Проводники, выпускаемые этим альянсом, имеют достаточно высокий ток (табл. 3) с высокой однородностью распределения по длине проводника, стабильно воспроизводимые характеристики при выпуске крупных партий. Технология, разработанная этими фирмами, уже сейчас обладает всеми признаками промышленной, а продукция – сертификатами и фирменными гарантиями качества (рис. 3). В США прочное лидерство захватила фирма *American Superconductor Corp.*, которой принадлежит мировой рекорд критической плотности тока короткого образца проводника ( $73 \text{ кА/см}^2$  при 77 К в собственном поле) и которая ставит перед собой амбициозную цель – «захват» рынка ВТСП-композитов, и не только в США. Для реализации этой цели фирмой запланирован в 2002 г. пуск завода на проектную мощность 10000 км композиционных проводников в год. История создания и развития этой фирмы, кстати говоря, наиболее яркий пример внимания государственных структур США, и прежде всего Департамента Энергетики к перспективным технологиям, требующим на начальном этапе существенных инвестиций, но сулящих в будущем прорыв в технике. Достаточно сказать, что объем вложений в ASC к концу 1999 г. достиг 180 млн. долл. США только из бюджета и примерно такую же сумму внесли крупные частные компании.

**Таблица 3.**

**Характеристики многожильных ленточных проводников на основе соединения Bi-2223, выпускаемых фирмой Vacuumschmelze.**

<i>Параметр:</i>	
Число жил	55
Материал матрицы	Ag или AgPd или Ag Au
Материал оболочки	Ag или AgMg или AgAu
Шаг твиста	6 мм и более
Стандартная длина единичного куска	500 м или больше/меньше (зависит от заказа)
Производственная длина	более 1000 м
Объёмная доля ВТСП фазы в сечении	(26-33)%
<i>По особому заказу:</i>	
Число жил	85, 121, 253 и более

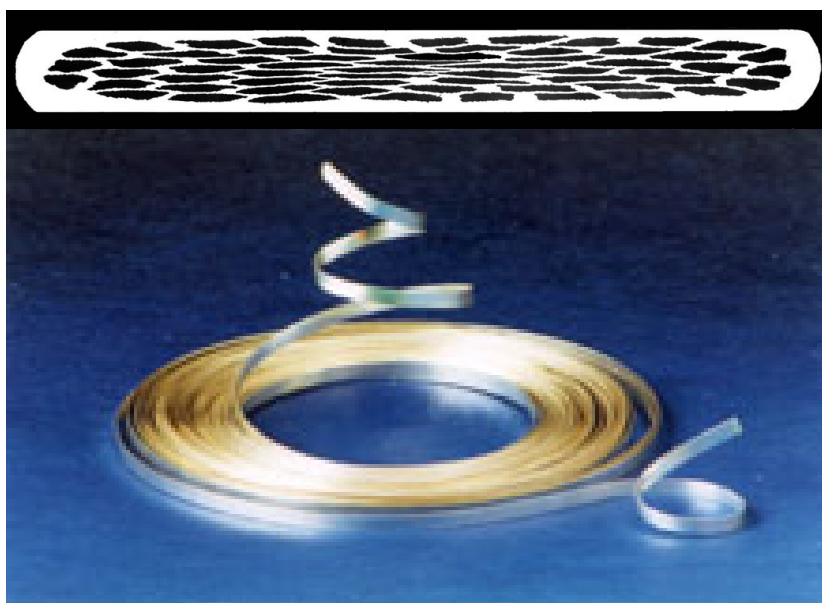


**Рис. 3.** Распределение значений критического тока  $I_c$  (А) по длине  $L$  (м) ленточного проводника Bi-2223/AgMg. Среднее значение критического тока 57 А (77 К, 0 Тл).

На этом фоне достижения отечественных производителей (ГНЦ РФ ВНИИНМ) выглядят значительно скромнее с точки зрения объемов, но никак ни с точки зрения свойств ВТСП-материалов. В ГНЦ РФ ВНИИНМ создан опытный технологический комплекс полного цикла производства длинномерных ВТСП-

композитов (рис. 4), позволяющий изготавливать такие проводники с длиной единичного куска до 1 км и свойствами, вполне приемлемыми для начала разработок криогенных электротехнических устройств различного типа.

Тип проводника	<i>Ленточный</i>
Материал оболочки	<i>Серебро, сплавы серебра с Mg, Ni, Al, Cu, Au, Sb</i>
Число жил	<i>61</i>
Поперечное сечение	<i>0,25x3,1 мм<sup>2</sup></i>
Объёмная доля ВТСП соединения в сечении	<i>30%</i>
Длина единичного куска	<i>до 1000 м</i>
Критический ток (77 К, 0 Тл)	<i>20-50 А</i>
Конструктивная плотность тока	<i>до 7 кА/см<sup>2</sup> (77 К, 0 Тл)</i>
Критическая плотность тока	<i>до 4 кА/см<sup>2</sup> (77 К, 0 Тл)</i>
Марка проводника	<i>B23-61-1</i>



**Рис. 4.** Композиционный сверхпроводник на основе высокотемпературного сверхпроводящего соединения Bi-2223: поперечное сечение и внешний вид (ГНЦ РФ ВНИИНМ).

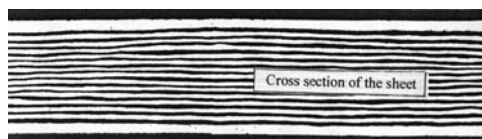
Кроме того, в ГНЦ РФ ВНИИНМ активно ведутся поисковые исследования и разработки новых типов сверхпроводящих материалов. В частности, разработан так называемый листовой композиционный ВТСП-материал (рис.5), не имеющий аналогов в мире, который может быть использован не только для прямого пропускания высоких транспортных токов (например, в мощных тоководах), но и прежде всего для реализации в электротехнике фундаментального свойства сверхпроводника – «выталкивания» внешнего магнитного поля (в магнитных экранах и др.).

Что касается других перспективных методов изготовления ВТСП-проводников, то следует отметить, что недостаточно высокая стойкость ВТСП-композитов, полученных методом «порошок-в-трубе», к воздействию приложенного магнитного поля при азотных температурах, инициировала в последние годы активные разработки так называемого «третьего» поколения сверхпроводящих материалов – длинномерных композитов, представляющих собой многослойные ультратонкие покрытия Y-Ba-Cu-O (плюс барьерные слои из диоксидов циркония и церия) на длинномерных металлических носителях – подложках (как правило, никель). Первые относительно короткие (несколько метров) образцы таких проводников обладают совершенно фантастическими свойствами – критическая плотность тока в жидком азоте превышает  $10^5$  А/см<sup>2</sup> в полях более 1 Тл. Однако к настоящему времени нельзя считать такие материалы достаточно техно-логически отработанными, а их свойства и технология требует отдельного обзора.

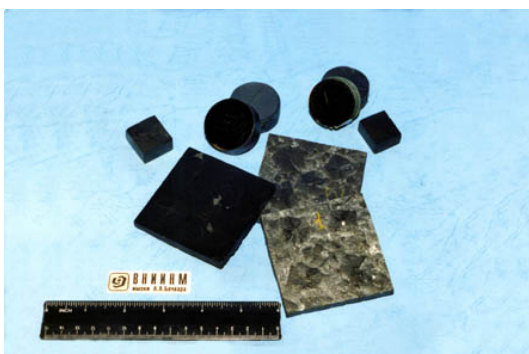
Другим, очень нетривиальным ВТСП-материалом, является массивная сверхпроводящая керамика (рис. 6), получаемая, как правило, методами направленной кристаллизации в градиенте температур. Эти материалы также требуют отдельного рассмотрения, выходящего за рамки настоящего обзора. Необходимо

также подчеркнуть, что склонность хрупкой керамики к растрескиванию даже при небольших термомеханических нагрузках и низкая теплопроводность (проблема охлаждения больших объемов материала) пока ограничивают применение таких сверхпроводников.

**14-слойный композиционный сверхпроводящий лист на основе соединения Bi-2223/Ag, 0.3 мм в толщине и до 300 мм по ширине.**



**Рис. 5.** Листовой композиционный материал на основе соединения Bi-2223 (ГНЦ РФ ВНИИНМ).

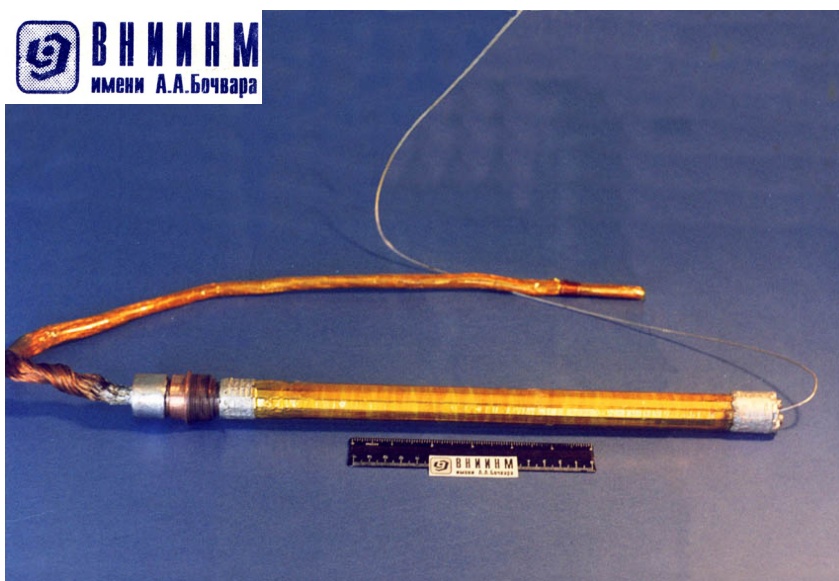


**Рис. 6.** Массивная ВТСП-керамика YBaCuO, изготовленная методом направленной кристаллизации (ГНЦ РФ ВНИИНМ).

### **Примеры применения ВТСП-проводников производство ГНЦ РФ ВНИИНМ в модельных электротехнических устройствах**

В последние годы на основе ВТСП-материалов, изготовленных в ГНЦ РФ ВНИИНМ, при тесном сотрудничестве ряда российских и зарубежных предприятий были разработаны, изготовлены и успешно испытаны криогенные электротехнические устройства.

Главной целью этих разработок являлись, во-первых, выработка критериев подбора тех или иных типов проводников для решения конкретной задачи и оптимизация конструкции устройств электротехники, во-вторых, попытка оценить те преимущества, которые возникают при использовании явления ВТСП. Приведенные ниже примеры таких работ в целом иллюстрируют те направления, в которых действуют и зарубежные специалисты.



**Рис. 7.** ВТСП-элемент токоввода на ток 1 кА, изготовленный на основе ленточного проводника Bi-2223/AgAu (ИФВЭ, ГНЦ РФ ВНИИНМ).

Первым таким примером, и первой в России успешной попыткой применения ВТСП-проводника, является разработка криогенного генератора с ротором дискового типа, выполненного на базе ВТСП-катушек (НИИ Электромаш, г. Санкт-Петербург). Оценки результатов испытаний показывают, что машина такого типа может быть использована как мобильный малогабаритный автономный источник электроэнергии для удаленных и малонаселенных районов. На рис. 7 показан сертифицированный ВТСП-элемент токоввода, изготовленный по техническому заданию CERN для проекта большого адронного коллайдера; следует подчеркнуть, что при выполнении этой работы удалось получить двукратный запас по значению критического тока при соблюдении очень жестких требований по величине теплопритока в холодную зону токоввода. Эта работа выполнялась в сотрудничестве с Институтом физики высоких энергий (г. Протвино, Московской обл.). На основе проводников ВНИИНМ в РНЦ «Курчатовский Институт» была изготовлена и успешно испытана серия ВТСП-катушек, которые показали свою эффективность, в особенности для намагничивания стального сердечника (рис. 8) и при разработке сверхпроводящего токоограничителя.

Кроме длинномерных ВТСП-композитов, для создания ряда устройств использовались ВТСП-листы и массивная сверхпроводящая керамика.

На основе полученных результатов авторам представляется, что важнейшей целью развития ВТСП-разработок является дальнейшее повышение технических характеристик ВТСП-материалов, создание на первом этапе экспериментального производства, а в перспективе – опытно-промышленного и промышленного производства ВТСП-проводников, разработка, изготовление и испытания серии полномасштабных макетов устройств криогенной электротехники, определение перспективных областей их применения и разработка конкретных проектов по созданию коммерческих образцов.

Этот вывод следует также из декларируемых РАО «ЕЭС России» планов по техническому перевооружению российского электроэнергетического комплекса, которое является насущной потребностью вследствие резкого ускорения износа оборудования. Возможный объем рынка электроэнергетического оборудования в России может быть оценен в 40–50 млрд. руб. в год. Учитывая в перспективе потребности в других областях техники (транспорт, медицина, военная и авиационно-космическая техника и др.), представляется, что основным направлением ВТСП-разработок на период до 2020 г. должно стать формирование промышленной инфраструктуры, включающей технологии добычи, обогащения исходных компонентов для производства ВТСП-соединений, химико-технологический комплекс по производству сверхпроводящей керамики, технологии изготовления технических сверхпроводящих материалов, комплекс исследований и разработок, направленный на создание сверхпроводящего оборудования.



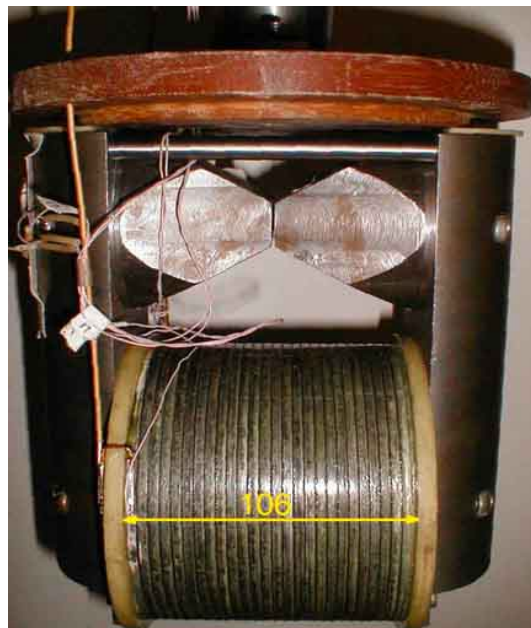
Сверхпроводящий магнит на основе Bi-2223/Ag, изготовленный по методу «Сверхпроводящий магнит на основе отжиг-намотка».

**Длина сверхпроводника – 118 м**

**Число витков – 300**

**Критический ток:**

- ◆ 77 К (1 мкВ/см) – 7.5 А
- ◆ 65 К (1 мкВ/см) – 14.2 А



Сверхпроводящий магнит на основе Bi-2223/Ag, изготовленный по методу «отжиг-намотка», с железным сердечником.

**Длина сверхпроводника – 118 м**

**Число витков – 300**

**Критический ток:**

- ◆ 77 К (1 мкВ/см) – 7.8 А
- ◆ 65 К (1 мкВ/см) – 16.2 А

Генерируемое поле в воздушном зазоре 1 мм:

- ◆ 77 К, 11 А – 1.98 Тл
- ◆ 65 К, 2.2 А – 2.2 Т

**Рис. 8.** ВТСП-магниты, изготовленные из ленточного проводника Bi-2223 (ГНЦ РФ ВНИИНМ, РИЦ «Курчатовский институт»).

## Литература

- [1]. D.B. Montgomery. The Future prospects for large applications of superconductivity, Superconductivity: research & development, № 9-10, 1998.
- [2]. CSAC Council in Superconductivity for American Competitiveness. The 5<sup>th</sup> International Superconductivity industry Summit (ISIS-5), Mount Fuji, Lake Yamanaka. Yamanashi Prefecture, Japan, May 14-16, 1996.
- [3]. Helmut Piel. "Future Prospect of Applied Superconductivity in Europe", Institute of Materials Science, University of Wuppertal, 42097 Wuppertal, Germany.
- [4]. Gregory J. Yurek, EIS'96, Superconductivity-Fulfilling Tomorrow's Global Needs, JW Marriott, Washington, DC, June 13-14, 1996.
- [5]. High-temperature superconductivity – ten years on. Ford P.J., Saunders G.A. Contemp. Phys., 1997, v.38, No 1, p.63-81.
- [6]. Supercond. Sci. Technol., 2000, 13, p. 464.