

СВЕРХПРОВОДНИКИ

для электроэнергетики

Том 3 выпуск 1
февраль 2006

Исследовательские центры
Провода Кабели
Трансформаторы

Фирмы
Генераторы
Токоограничители

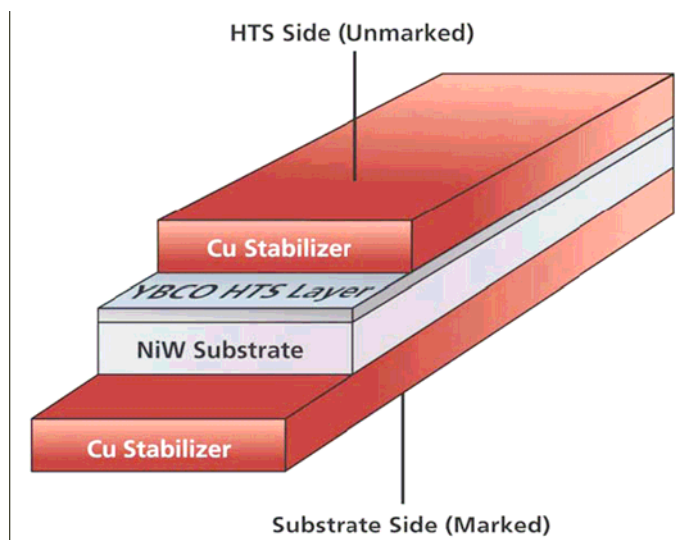
Инвесторы
Накопители

СЕГОДНЯШНИЙ РЕКОРД

ВТСП провода 2-го поколения в продаже



Компания American Superconductor (AMSC) сообщает о начале продаж нового трехслойного сверхпроводящего ВТСП провода второго поколения шириной 4,4 мм (промышленный стандарт 344). Токонесущий элемент представляет собой пленку YBCO, нанесенную на подложку Ni-W сплава через буферные оксидные слои. Пленка YBCO покрыта серебром. В свою очередь, весь проводник с обеих сторон заламинирован медной фольгой, как с защитной целью, так и для удобства распайки. Рекомендуется паять припоями с температурой плавления менее 150°C. Например, припоем эвтектического состава 52In48Sn с $T_{пл}=118^{\circ}\text{C}$ (индиевый сплав 1E). При пайке следует использовать только безкислотные флюсы, такие как HF260, Litton ESF33, Multicore Kester 135.



Спецификация проводника:

Толщина (средняя): 0.20 (+/- 0.02) мм

Ширина (средняя): 4.35 (+/- 0.05) мм

Максимально допустимое напряжение растяжения
(с сохранением 95% I_c при $T=77\text{ K}$): 150 МПа

Максимально допустимая деформация растяжения
(с сохранением 95% I_c при $T=77\text{ K}$): 0.4%

Максимально допустимая деформация сжатия (77K): 0.3%

Минимальный диаметр изгиба: 35 мм.

Минимальный критический ток при непрерывной длине 100 м:
(77 K, собственное поле, 1 мкВ/см): 70 А.

http://www.amsuper.com/products/htsWire/documents/WFS_344_0905_V3FINAL.pdf

И далее...

ВТСП РАЗРАБОТКИ В РОССИИ

*В России оживились разработки
сильноточных сверхпроводни-
ковых устройств* 2

ВТСП И НТСП УСТРОЙСТВА

*Генераторы переменного тока на
сверхпроводниках* 4

ЗАРУБЕЖНЫЕ КОМПАНИИ

Trithor GmbH, Германия 9

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Что нового можно еще придум-
ать в методе импульсного
лазерного осаждения?* 12

ВТСП КАБЕЛИ В СЕТЯХ

*Текущие и законченные проекты
по ВТСП Bi2223кабелям* 13

Поздравления профессорам А.Р.Каулю и О.Ю.Горбенко в связи с присуждением Ломоносовской премии II степени Московского государственного университета за цикл работ «Гетероэпитаксия в разработке новых тонкопленочных материалов на основе оксидов: новые возможности», а также научному сотруднику ИЭЭ РАН Н.Ю.Вандюку и аспирантам С.С.Тимофееву и И.В.Волынкину - лауреатам премии РАО ЕЭС «Новая генерация» 2005 г. на тему: «Разработка высоковольтного синхронного генератора с использованием высокотемпературной сверхпроводимости для ветроэнергетической установки».

ВТСП РАЗРАБОТКИ В РОССИИ

В России оживились разработчики высоко-точных сверхпроводниковых устройств

На фоне глобальных энергетических проблем в мире все большее значение приобретают сверхпроводниковые технологии, что отразилось в соответствующих интенсивных разработках за рубежом. В 2005 г. на этот факт обратили внимание и в России - Роснаука, РФФИ и ОАО «ФСК ЕЭС» открыли финансирование сверхпроводящих электроэнергетических проектов.

Контракты Роснауки (<http://www.fasi.gov.ru>; <http://www.goszakupki.ru>).

В рамках конкурса Роснауки 2005 г.

- по приоритетному направлению *"Индустрия наносистем и материалы" (I очередь)* заключен контракт с РНЦ «Курчатовский институт» по теме «Разработка перспективных технологий получения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) - материалов второго поколения»; соисполнители РНЦ КИ – химический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, ФГУП ВНИИНМ им. А.А.Бочвара, Институт физики металлов УрО РАН (Екатеринбург).
- по приоритетному направлению *"Энергетика и энергосбережение" (II очередь)* заключен контракт с ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт судовой электро-

техники и технологии" (ФГУП "ЦНИИ СЭТ"), г. Санкт-Петербург по теме "Разработка электрооборудования с использованием технологии высокотемпературной сверхпроводимости".

Подробная информация о разработках по контракту с РНЦ КИ представлена в 3-ем выпуске этого бюллетеня за 2005 г. (<http://perst.issph.kiae.ru>). В контракт ЦНИИСЭТ в качестве соисполнителей включены академические и промышленные организации – ВНИИЭлектромаш, ИИТЭЭ, Институт теплофизики УрО РАН, МАИ и другие. Цель - разработать модельную автономную электроэнергетическую установку мощностью 50 кВт, включающую ВТСП устройства: синхронный генератор, трехфазный трансформатор, двигатель, токоограничитель, объединенные ВТСП кабелем. Двигатель управляется микропроцессорной системой через преобразователь. Планируется собрать все устройства на едином стенде и испытать их работу в связке.

Проекты РФФИ

В 2005 г. фонд РФФИ открыл новый конкурс в области знаний «Фундаментальные основы инженерных наук». Ниже в таблице - победители по направлению «Сверхпроводимость» раздела «Электротехника и техническая проводимость» (<http://grant.rffi.ru>).

Организация	Руководитель проекта	Название проекта
ВЭИ	Волошин И. Ф.	Исследование электромагнитных потерь в высокотемпературных сверхпроводниках в наклонном переменном магнитном поле
ФГУ РНЦ КИ	Дорофеев Г. Л.	Лавинообразный переход сверхпроводника в нормальное состояние
ВЭИ	Калинов А. В	Оптимизация свойств монокристаллических сверхпроводников для использования в резистивных токоограничителях
МАИ	Ковалев Л. К.	Бесконтактные криогенные электрические машины на базе новых высокотемпературных сверхпроводящих материалов.
ОИВТ РАН	Копылов С. И.	Сверхпроводящий токоограничивающий реактор
СПбВНИИЭМаш	Платонова М. Ю.	Развитие метода электродинамического моделирования, применяемого к сверхпроводниковым электротехническим устройствам и комплексам
МГТУ им. Н.Э.Баумана НУК ИУ	Полущенко О. Л.	Исследование перспектив создания массивных квазимонокристаллических ВТСП материалов для электротехнического и электроэнергетического оборудования нового поколения

Научный руководитель ИСФТТ РНЦ «Курчатовский Институт», чл.-корр РАН Н.А.Черноплеков выступил с докладом «Современное состояние использования сверхпроводниковых технологий в электроэнергетике» на заседании секции НТС РАО «ЕЭС России» «Стратегия развития, надежность и безопасность в электроэнергетике» и на семинаре

«Физико-технические проблемы ядерной энергетики» в Курчатовском институте.

Подробно проанализировав состояние разработок за рубежом, Н.А. охарактеризовал также российские разработки, выполняемые по инициативе ОАО «ФСК ЕЭС». Наиболее существенной здесь является Программа 02 «Сверхпроводниковые технологии

в сетях ЕНЭС», утвержденная Советом директоров ОАО «ФСК ЕЭС».

Первый этап этой программы предусматривает проведение в период 2004–2007 гг. НИОКР по определению перспектив использования сверхпроводникового оборудования в сетях ЕНЭС, создание макетных, опытных, опытно-промышленных образцов: сверхпроводящего кабеля, токоограничителя, трансформатора, накопителя энергии, их испытание в эксплуатационных условиях. Этим же этапом предусматривается создание полигона для испытаний СП оборудования (п/с Белый Раст). Согласно программе стоимость первого этапа – 452 млн. руб.

Второй этап – проведение долгосрочных испытаний, создание и ввод в опытно-промышленную эксплуатацию сверхпроводящего кабеля и индуктивного накопителя (СПИНЭ), принятие окончательного решения об использовании сверхпроводникового оборудования в сетях ОАО «ФСК ЕЭС».

Результаты выполнения программы в 2004–2005 гг.

1. Проведено исследование состояния в мире и перспектив разработок ВТСП оборудования, пригодного для развития сетей ОАО «ФСК ЕЭС» (РНЦ «КИ» и ОАО ВНИИЭлектроэнергетики (ВНИИЭ); 09.2003 – 12.2003; стоимость 2262,6 тыс. руб.; разработаны рекомендации по критическим направлениям использования).

2. Проведен анализ возможностей и разработаны перспективные решения по накопителям мощностью 250 МВт и запасенной энергией 1 ГВт×ч (РНЦ «КИ» и ОАО ВНИИЭ; 04.2004 – 11.2004; стоимость 2700 тыс. руб.; разработаны рекомендации по выбору вариантов).

3. Разработаны технические предложения по созданию комплекса электроэнергетических устройств с использованием сверхпроводниковых технологий и оборудования на электродинамической модели (СПб Государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП); 04.2004 – 05.2004; стоимость 1300 тыс. руб.; проведена предэскизная проработка комплекса из сверхпроводниковых трансформатора, токоограничителя, кабеля, синхронного компенсатора, индукционного и кинетического накопителей энергии).

4. Разработаны технические предложения по опытно-промышленному образцу индукционного накопителя, предназначенного для п/с «Плисецк» (ФГУП НИИ электрофизической аппаратуры (НИИЭФА); 04.2005 – 12.2005; стоимость 5000 тыс. руб.; предложен вариант СПИНЭ на 10^7 – 10^9 Дж для применения на реальном объекте ОФО «ФСК ЕЭС»).

5. Исследованы режимы работы и эффективность применения СПИНЭ на п/с «Плисецк» (ОАО ВНИИЭ; 02.2005 – 12.2005; стоимость 5900 тыс. руб.; проведен анализ процессов в энергосистеме при установке СПИНЭ).

6. Разработаны технические требования на сверхпроводниковый трансформатор - 1000 кВА/10 кВ (ОАО ВНИИЭ; 01.2005 – 05.2005; стоимость 1180 тыс. руб.)

7. Определены оптимальные схемы и алгоритмы управления вентильного преобразователя СПИНЭ для п/с «Плисецк» (ОАО ВНИИЭ; 02.2005 – 12.2005; стоимость 5900 тыс. руб.; технико-экономическое сравнение вариантов СПИНЭ).

8. Разработан и создан испытательный стенд и полномасштабный по сечению отрезок жилы сверхпроводящего кабеля длиной до 5 м на ток 1–2 кА (ВНИИ кабельной промышленности (ВНИИКП); 04.2005 – 11.2005; стоимость 7000 тыс. руб.).

9. Разработаны и изготовлены высоковольтные токовводы на 20 кВ для сверхпроводящего кабеля (ВНИИКП; 04.2005 – 11.2006; стоимость 2000 тыс. руб.).

10. Разработаны технология, оборудование и оснастка для изготовления сверхпроводящего кабеля (ВНИИКП; 04.2005 – 11.2006; стоимость 4000 тыс. руб.).

11. Разработан и изготовлен сверхпроводящий кабель (30 м, 20 кВ, 1 – 2 кА) для испытания в сетях ОАО «ФСК ЕЭС» (ВНИИКП; 04.2005 – 11.2006; стоимость 7000 тыс. руб.).

Рассматриваются предложения в проект программы НИОКР на 2006–2008 гг., в том числе:

1. Исследование возможности использования СП оборудования в распределительных сетях глубоких вводов электроэнергии г. Москвы (ВНИИЭ; 06.2005 – 06.2006; стоимость 4500 тыс. руб.; технические предложения).

2. Разработка и изготовление однофазного СОТ на 10 кВ (ВНИИЭ; 01.2006 – 11.2006; стоимость 19500 тыс. руб.; СОТ на напряжение 10 кВ).

3. Комплекс работ по созданию СПСК на 20 кВ длиной 30 м (ВНИИКП; 04.2005 – 11.2006; стоимость 38500 тыс. руб.; СПСК длиной 30 м на 20 кВ).

4. Разработка и изготовление СП трансформатора на 1000 кВт на напряжение 10 кВ (на конкурсной основе, 01.2006 – 06.2008; стоимость на 2006г. 19500 тыс. руб.; СП трансформатор на 1000 кВт и 10 кВ).

5. Создание электронной базы данных «СП технологии в электроэнергетике» (РНЦ «КИ»; ежегодно 700 тыс. руб.; текущая информация и фактографическая база данных).

6. Создание международного инновационно-технологического полигона СП технологий в сетях ЕНЭС в составе НТЦ ОАО «ФСК ЕЭС» на полигоне «Белый Раст» (ВНИИЭ; 01.2006 – 11.2008; стоимость на 2006 год - 50000 тыс. руб.; полигон СП технологий в сетях ЕНЭС).

Выставка «Электрические сети России».

С 29 ноября по 2 декабря 2005 г. ЗАО «Энервек-Экспо» при поддержке ОАО «ФСК ЕЭС» провело в Москве в выставочном павильоне № 69 на ВВЦ спе-

циализированную международную выставку «Электрические сети России» (<http://www.expoelectroseti.ru>). На стенде ФСК ЕЭС впервые в России были представлены российские сверхпроводниковые разработки в интересах электроэнергетики. Экспонаты представили РИЦ «Курчатовский институт», ВНИИНМ им. А.А.Бочвара, ВНИИКП, НИИ ИТЭЭ при ГУАП, ИВТ РАН, МАИ (перечень экспонатов представлен в предыдущем выпуске бюллетеня – 2005, 2, вып.5). Большинство разработок были представлены в виде стендов с фотографиями, небольших образцов проводов и кабелей, макетов устройств. Из действующих устройств – только макет дороги с магнитным ВТСП подвесом (МАИ), да во дворе выставочного павильона – прикрытый прозрачной пленкой (от разразившегося снегопада) 5 МДж сверхпроводниковый индуктивный накопитель (ОИВТ РАН) – из-за большого веса его не решились разместить на 2 этаже павильона, где проходила выставка. Если сравнить с выставкой, проходившей на EUCAS'2005, на которую American Superconductor и Sumitomo доставили из-за океанов бобины с 500 метровыми ВТСП проводами, то выставленные образцы представляются достаточно скромными. Но... можно забыть об относительной скромности экспонатов, если вспомнить о соотношении зарубежных и отечественных объемов соответствующего финансирования, о которых многократно сообщал бюллетень в предыдущих выпусках. Более важно, что такой гигант, как ОАО «ФСК ЕЭС» обратил свой взор на сверхпроводимость. На пресс-конференции при открытии выставки заместитель Председателя Правления ОАО "ФСК ЕЭС" В.В. Дорофеев подчеркивал, что ФСК *выбирает сверхпроводниковую технологию как основную для перспективного перевооружения электроэнергетики России* (накопители, кабели, трансформаторы, электроподстанции).

Первые шаги к надежным и эффективным электросетям в России сделаны, важно продолжить движение, не снижая напряжения в сети исполнителей!

С.Корецкая, А.Чернышева

ВТСП И НТСП УСТРОЙСТВА

Генераторы переменного тока на сверхпроводниках

Применение сверхпроводников (СП) позволяет создать синхронные генераторы переменного тока, обладающие высокой эффективностью и мощностью при относительно небольших размерах и массе. Действительно, КПД СП генераторов может превышать 99%, при этом потери, типичные для обычных генераторов, сокращаются минимум в два раза. Примерно во столько же раз уменьшаются габариты и вес машины. Удивительно, что такого сокращения в эффективности, размерах и массе удаётся достичь даже несмотря на необходимость использования криосистемы для охлаждения сверхпроводника! Дополнительными преимуществами СП

генераторов являются повышенная стабильность работы при использовании в электрических сетях и большая долговечность. Срок службы обычных генераторов ограничен 30-40 годами из-за старения изоляции обмоток под действием высокой температуры. Этот неблагоприятный фактор полностью отсутствует у криогенных СП устройств.

Два основных преимущества СП генераторов, *компактность* и *высокая эффективность*, диктуют области их первоочередного применения.

Компактные генераторы электрической энергии с базированием на мобильной платформе (самолёте, судне, поезде или автомобиле) нужны прежде всего военным [1]. От наличия мобильных генераторов мощностью в десятки и сотни МВт зависит создание электромагнитного (микроволнового) оружия, тактических лазеров и систем электромагнитного запуска. Интересно, что сама по себе высокая эффективность здесь главным преимуществом не является. Гораздо важнее то, что в СП генераторах лишь небольшая часть энергии выделяется в виде тепла, которое для обеспечения теплового баланса надо отводить от системы. Конечно же, для мобильных СП генераторов можно найти и мирное применение – например, в качестве резервных источников энергии в аэропортах, больничных центрах, на критических производствах. Серьёзные шансы на применение таких машин есть и в судостроительной промышленности, как в военной, так и в гражданской.

Создание мощных (>100 МВт) стационарных СП генераторов с высоким КПД (>99%) имеет большое значение для традиционной электроэнергетики. Действительно, по оценке Министерства энергетики США (DoE - Department of Energy), повышение эффективности преобразования энергии на 0,5% позволит экономить до 200 тыс. долл. в год на каждый генератор мощностью 100 МВт [2].

Начавшаяся около 40 лет назад история создания СП генераторов зеркально отражает непростые пути развития технологии СП проводов. Широкое распространение (коммерциализация) силовых СП устройств возможно лишь при условии, что характеристики провода отвечают крайне жёстким требованиям [3]. В таблице приведены параметры ВТСП проводов, однако, за исключением рабочей температуры и стоимости, эти параметры справедливы и для НТСП. Заметим, что стоимость НТСП Nb-Ti составляет около 2 долл./кАм, а цена Nb₃Sn – от 4 до 10 долл./кАм, в зависимости от количества жил в кабеле (данные приведены на 1997 год по [3]). В силу целого ряда причин, в разработках НТСП генераторов использовали почти исключительно провод из Nb-Ti.

Таблица. Промышленные требования к ВТСП проводам для применения в различных областях [3].

Применение	Требования к ВТСП материалу							
	Jс А/см ²	Поле Тл	T К	Iс А	Длина м	Деформа- ция %	Радиус изгиба м	Стоимость долл./кАм
Генератор 100 МВт	5·10 ⁴ (а)	4-5	20-50	500-1000	500- 1000	0.2	0.1	10
Ограничитель тока	10 ⁴ -10 ⁵	0.3-3	40-77	10 ³ -10 ⁴	1000	0.2	0.1	10-30
Двигатель (1000 л.с.)	10 ⁵	2-4	25-77	100-500	1000	0.2-0.3	0.05	10
Накопитель SMES 1МВт·час	10 ⁵	5-10	20-77	10 ⁴	1000	0.2	1	2-5
Кабель	10 ⁴ -10 ⁵	<0.2	65-77	25-30 ^(б)	100	0.4	2 ^(в)	10-100 ^г
Трансформатор	10 ⁴ -10 ⁵	0.1	20-77	200-1400	1000	0.2	0.2	10

(а) плотность тока для отдельных сверхпроводящих жил

(б) ток для отдельного провода; кабель, содержащий много проводов, должен нести ток около 10 кА

(в) для кабеля

(г) – цена 100 долл./кАм допустима только в чрезвычайных ситуациях

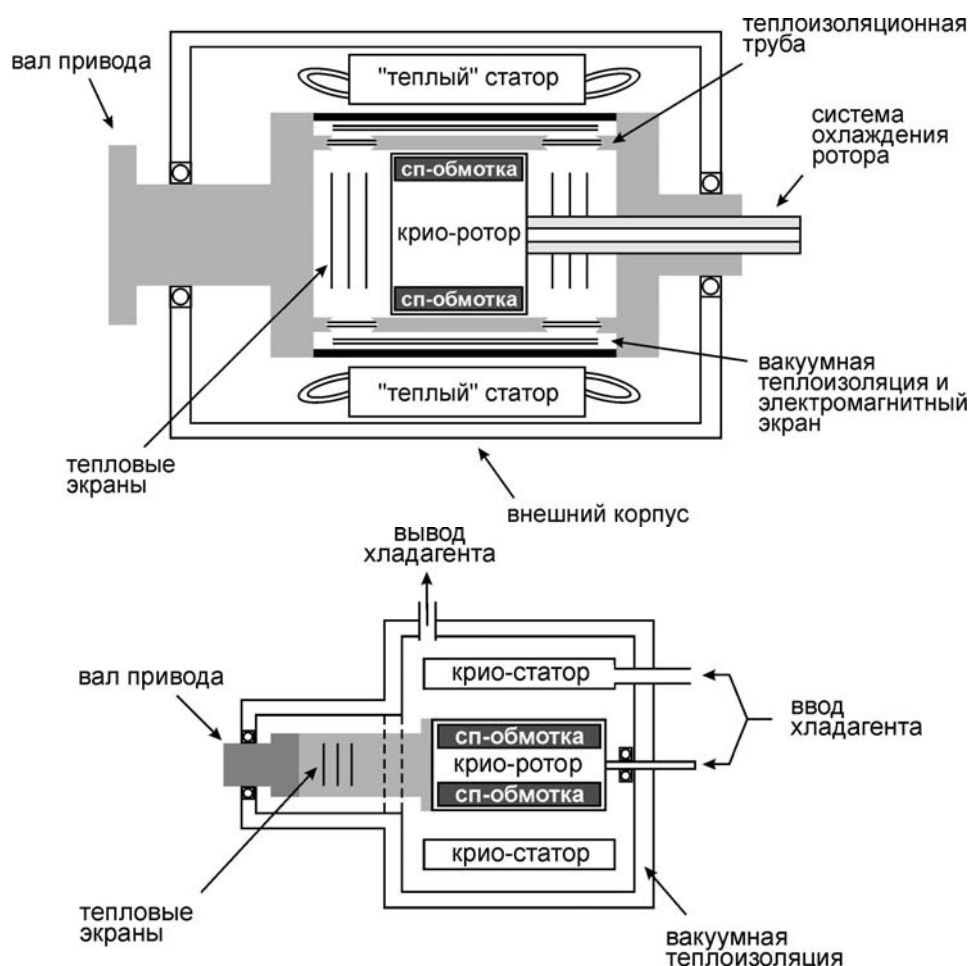


Рис. 1. Схемы классического (вверху) и полностью сверхпроводникового (внизу) СП генераторов.

СП генераторы делят обычно на два класса (рис. 1). Первый класс составляют *классические, или гибридные*, СП генераторы. В них сверхпроводник применяют только в возбуждающей обмотке (как правило, ротора), а для другой обмотки используют резистивный материал, как в обычном генераторе.

На разработке этого варианта General Electric строит свою долгосрочную стратегию, предлагая заменить в существующих генераторах обычные роторы на сверхпроводящие. В такой конструкции сверхпроводник несёт только постоянный ток, так что потери практически равны нулю. К недостаткам

гибридной схемы относят необходимость термоизоляции возбуждающей обмотки от «тёплой» части генератора. Этого достигают с использованием вакуумного барьера по типу сосуда Дьюара. Существенное внимание также уделяют электромагнитному экранированию СП обмотки с целью снизить вклад вихревых токов.

Второй тип составляют *полностью сверхпроводниковые* генераторы, в которых обе обмотки выполнены из сверхпроводника. В данном случае, естественно, охлаждают весь агрегат. При использовании этой конструкции появляются дополнительные требования к сверхпроводнику, составляющему обмотку статора, так как потери на переменном токе могут быть очень существенными. Одна из первых неудач в этой области – полностью сверхпроводниковый генератор на 50 кВт, изготовленный и протестированный в 1967 году ф. Dynatech – обнаружила принципиальные ограничения, связанные с использованием сверхпроводника на переменном токе. *Эти ограничения были полностью сняты в 1983 году в результате разработки проводников с жилами субмикронного диаметра, имеющими малые потери на токах промышленной частоты.* Потенциально полностью сверхпроводниковый тип генераторов обладает повышенной мощностью при меньших размерах и массе. В настоящее время фактически разрабатывают оба типа генераторов.

В первых гибридных машинах, созданных к началу 70-х, сверхпроводники использовали только в неподвижной возбуждающей обмотке, в то время как вращающуюся обмотку изготавливали из металлического провода. Мощность этих экспериментальных машин, изготовленных в СССР, США, ФРГ и Японии составляла от 8 до 30 кВт.



Рис. 2. СП генератор КТГ-20 на 20 МВт, СССР, начало 80-х [4].

Уникальный опыт разработки СП генераторов был накоплен в СССР. Исследования в этом направлении начались в 60-х во ВНИИЭлектромаш (Ленинград). Первая электрическая машина со сверхпроводниками была спроектирована в 1963 г. и мощность её составляла всего несколько ватт, а уже в 1980-1992 гг. пер-

вый в мире СП генератор (КТГ-20) мощностью 20 МВт (рис. 2) прошел испытания в системе Ленэнерго.

В начале 80-х был создан СП генератор на 20 МВт и в США (General Electric).

Охлаждаемый гелием сверхпроводящий ротор был разработан в начале 70-х ф. Westinghouse по заказу ВВС США и успешно испытан при вращении со скоростью 12 тыс. оборотов в минуту.

Параллельно велись работы по созданию гибридных СП генераторов со сверхпроводниковым ротором и медным статором, увенчавшиеся созданием машины мощностью 2 МВт в США. Именно этот дизайн (сверхпроводниковый ротор - резистивный статор) и получил наибольшее распространение в дальнейшем.

Эти достижения открыли путь к созданию машин большего размера, и уже к середине 70-х СП генераторы мощностью порядка 1 ГВт считались принципиально реализуемой задачей.

Наверное, важно хотя бы перечислить проблемы, которые решали учёные и инженеры того времени: охлаждение жидким гелием вращающегося ротора генератора; герметизация системы высоковакуумной теплоизоляции; обеспечение механической прочности обмоток; юстировка и балансировка ротора; подавление вибраций работающей машины. Нельзя сказать, что искомые решения всегда были просты. Например, охлаждение ротора генератора КТГ-20 (СССР) проводили в три этапа, длилась эта процедура 75 часов. Существенную проблему представляла механическая фиксация сверхпроводящей обмотки. Из-за очень низкой теплоёмкости материала при температуре жидкого гелия опасный нагрев и переход сверхпроводника в нормальное состояние может быть вызван просто трением неожиданно сдвинувшегося со своего места провода! И так далее...

В планах разработчиков стояло создание генераторов большей мощности до 1 ГВт. К концу 80-х специалисты компании General Electric разработали концепцию машины мощностью 300 МВт. Генератор такой же мощности был разработан и изготовлен в СССР (КТГ-300), но затем в 1985 г. в связи с началом перестройки работы были прекращены.

Открытие ВТСП оказало большое и неоднозначное влияние на развитие этой области. На новые сверхпроводники возложили большие (заметим, более чем обоснованные) надежды и многие работы по созданию машин на НТСП были сокращены или приостановлены. Высокий темп исследований остался только в Японии, благодаря чему на сегодняшний день именно японцы являются лидерами в деле создания НТСП генераторов. Многолетний проект Super-GM стартовал в 1987-м году и финансировался NEDO, Министерством внешней торговли и промышленности (MITI) и крупными японскими фирмами (Hitachi, Mitsubishi, Toshiba). Над

проектом работал коллектив из 250 человек, а объём финансирования превысил 250 млн. долл. В 2000г. проект увенчался созданием НТСП генератора с рекордной выходной мощностью в 70 МВт (рис. 3), который испытывали в непрерывном режиме в течении 1500 часов (что также является рекордом).

Успех Super-GM вдохновил японцев на разработку НТСП генераторов мощностью 200 МВт и более. По оценкам менеджеров проекта, только в Японии объём продаж таких генераторов может составить 440 млн. долл. ежегодно (20-30 генераторов на 200-600 МВт и 2 генератора по 1 ГВт). Основным преимуществом новых машин считают их стабильность и эффективность при работе в сети, например, максимальная пропускная способность системы возрастает на 30%, КПД возрастает на 0.5-1%, при этом размеры и вес уменьшаются в два раза.

Показанная на рис. 3 структура Nb-Ti-кабеля была разработана для решения одной из самых важных задач в области силовых применений сверхпроводников: снижения потерь на переменном токе. Снижение потерь на переменном токе – важнейший шаг к полностью сверхпроводниковой машине, в которой обмотка не только ротора, но и статора выполнена из сверхпроводника. В начале 90-х полностью сверхпроводниковые генераторы малой мощности были продемонстрированы во Франции (18 кВт, GEC ALSTHOM) и в Японии (30 кВт).

Успех Super-GM вдохновил японцев на разработку НТСП генераторов мощностью 200 МВт и более. По оценкам менеджеров проекта, только в Японии объём продаж таких генераторов может составить 440 млн. долл. ежегодно (20-30 генераторов на 200-600 МВт и 2 генератора по 1 ГВт). Основным преимуществом новых машин считают их стабильность и эффективность при работе в сети, например, максимальная пропускная способность системы возрастает на 30%, КПД возрастает на 0.5-1%, при этом размеры и вес уменьшаются в два раза.

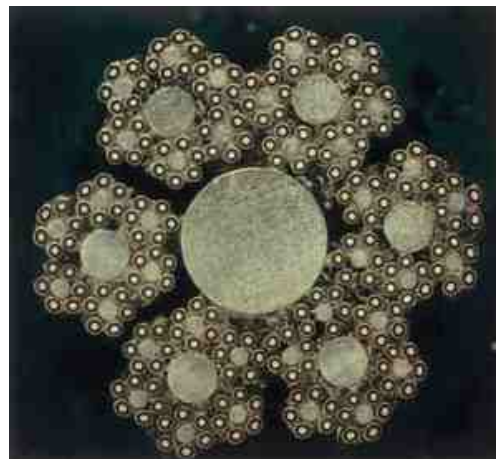


Рис. 3. Японский генератор Super-GM мощностью 70 МВт (слева); многожильный Nb-Ti-кабель с пониженными потерями на переменном токе (справа), 1997 год.



Рис. 4. ВТСП генератор на 4 МВт, Siemens+EAS, 2005 г.

Разработки НТСП генераторов создали прочную основу развития ещё более эффективных ВТСП машин. Однако прогресс в этой области критическим образом зависит от наличия ВТСП кабеля с высокими параметрами (см. таблицу).

Первые ВТСП генераторы появились во второй половине 90-х, следуя за развитием технологии проводов на основе BSCCO. Провода первого поколения

позволили поднять рабочую температуру с 4 до 20-40 К. К большому сожалению, применение проводов из BSCCO при температурах около 77 К вряд ли возможно из-за быстрого падения критического тока в магнитном поле. Тем не менее, даже такое повышение рабочей температуры позволило существенно снизить опасность перегрева СП провода, так как теплоёмкость ВТСП материала при этих температурах уже существенно выше, чем при температуре жидкого гелия.

Летом 2005-го года в Германии введён в эксплуатацию генератор на ВТСП первого поколения мощностью 4 МВт – результат совместной работы инженеров Siemens и производителей ВТСП провода European Advanced Superconductors GmbH (EAS) (рис. 4) [5]. Менеджеры проекта предполагают использование таких генераторов на морских судах, оборудованных электромоторами.

В 2003 г. General Electric с использованием BSCCO провода (производства American Superconductor) успешно создала прототип ВТСП генератора на 1,5 МВт (рис. 5). В настоящее время General Electric ведёт разработку и изготовление ротора ВТСП генератора мощностью 100 МВт (предполагается, что его можно будет также использовать в уже имею-

щихся генераторах вместо обычного ротора). Этот проект финансируют Министерство энергетики США и компания General Electric, бюджет на 2002-2006 гг. составляет 26,7 млн. долл. Однако, уже в процессе создания этого обзора стало известно, что выполнение этого проекта досрочно прерывается с марта текущего года [6]. На принятие решения оказали влияние сразу несколько факторов:

- для потребностей рынка лучше подходят генераторы большей мощности (500 МВт);
- провода первого поколения не отвечают многим требованиям, диктуемым высокой мощностью машины (в частности, крайне желательно повышение предельно допустимой деформации с 0.2 до 0.5%);
- стоимость провода и расходы на охлаждение по-прежнему высоки (по словам менеджера проекта Джеймса Фогерти, «пороговая» цена ВТСП провода не должна превышать 15-25 долл./кАм, а рабочая температура быть не ниже 50 К).

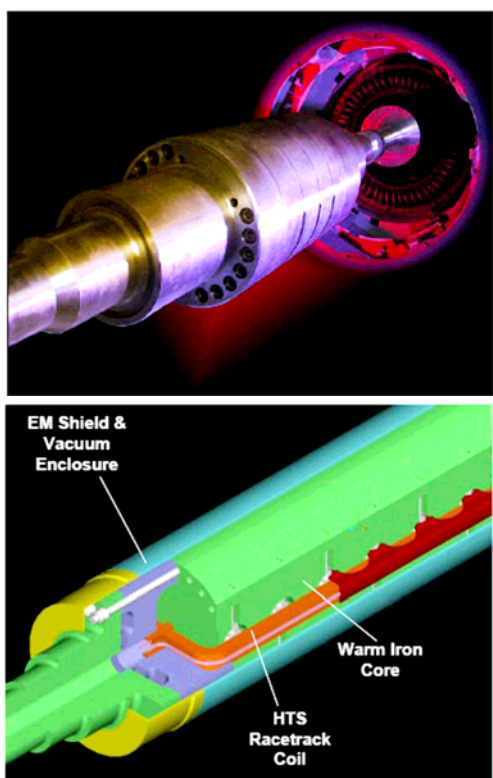


Рис. 5. ВТСП генератор мощностью 1,5 МВт, изготовленный с использованием кабеля первого поколения (General Electric, American Superconductor), конструкция ротора, 2003 год.

Так что и в этой области основные надежды разработчиков связаны с ВТСП проводами 2-го поколения. Надо сказать, что ленты на основе YBCO (ВТСП 2-го поколения) с длиной и характеристиками, необходимыми для создания первых прототипов генераторов, появились лишь недавно. Работы по генераторам на ВТСП 2-го поколения ведут компании Long Electromagnetics (с 2004 г., по контракту с BBC США) и Rockwell в сотрудничестве с IGC SuperPower Inc. (рис. 6). Лидеры в производст-

ве 2G провода обещают скорый прогресс в этой области. SuperPower планирует поставить в 2006 г. 10 км 2G провода в Японию. Эта компания получила в январе 2006 г. 10 млн. контракт от американских военных на развитие 2G-технологии [7]. Их конкуренты American Superconductor уже отгрузили в декабре 2005-го 1 км 2G-ленты первым заказчиком [8] и имеют портфель заказов на 2006 г.

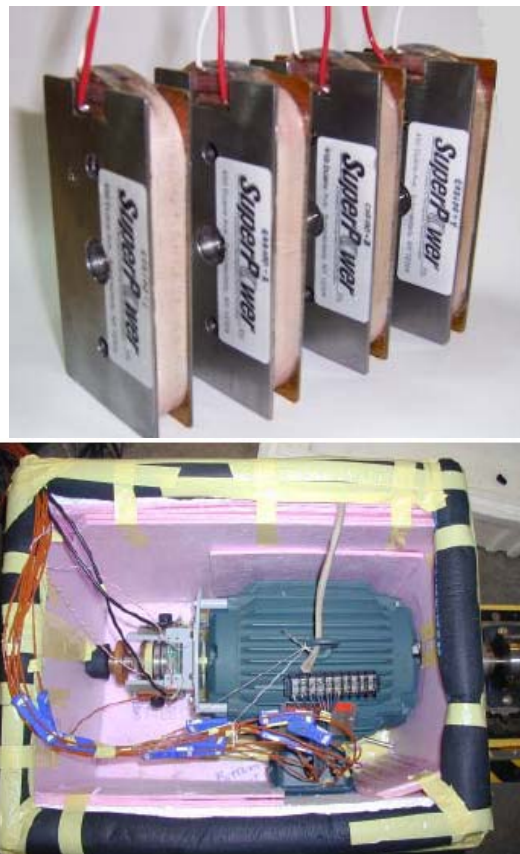


Рис. 6. Обмотки из провода 2-го поколения производства ф. SuperPower (по 6 м провода YBCO в каждой); генератор на 900 Вт, работающий при температуре 81 К (ток в обмотке в магнитном поле – 40 А), 2004 год.

В России разработан проект синхронного ВТСП генератора на 200 МВт на напряжение 220 кВ (ВНИИЭлектромаш). Молодые специалисты ИЭЭ РАН Н.Ю.Вандюк, И.В.Волынкин, С.С.Тимофеев получили престижную премию РАО "ЕЭС" и РАН, называемую "Новая генерация" за работу "Разработка высоковольтного синхронного генератора с использованием высокотемпературной сверхпроводимости". Разработка связана с созданием ветроэнергетической установки, расположенной на платформе в океане. Использование ВТСП и других новых материалов в синхронном генераторе позволяет обеспечить уменьшенные массогабаритные характеристики, повышенную надежность, пониженные потери и экологическую безопасность машины, а значит и ветроэнергетической установки в целом. Разрабатывается сверхпроводниковый синхронный генератор мощностью 500 кВт на напряжение 10,5 кВ. Генератор без

промежуточного трансформатора соединяется с полупроводниковым тиристорным преобразователем, выпрямляющим генерируемый ток. Криогенное оборудование (криоохладитель по циклу Гиффорда-Макмагона) занимает место трансформатора в опорной башне ветроустановки, там же расположена преобразовательная установка. В цепь «генератор-преобразователь» могут быть включены накопители энергии (в том числе сверхпроводниковые) и сверхпроводниковые ограничители тока. Энергия передается потребителю по кабелю постоянного тока через выпрямительную и инверторную подстанции. Кабель проложен по дну моря и соединяет морскую платформу с потребителем на берегу. Планируется использование ВТСП соединений Bi-2212, Bi-2223, Y123 для обмоток статора и ротора генератора, электротехнической и аморфной сталей для магнитной системы, электрической изоляции, устойчивой к термоциклированию и криогенным температурам. Ротор и статор машины размещены в едином криостате. Высоковольтная обмотка статора выполнена из катушек седлообразной формы.

Авторы разработки провели комплекс теоретических исследований электромагнитных и тепловых процессов в синхронных машинах с редкоземельными постоянными магнитами и ВТСП массивами:

- исследовали распределение электромагнитных полей, создаваемых седлообразными и трековыми обмотками;
- провели исследования на макетах и моделях с целью проверки теоретических положений;
- изготовили модельные синхронные машины дискового типа с редкоземельными постоянными магнитами и ВТСП массивами и стенды для их испытаний;
- провели исследования режимов работы изготовленных модельных устройств.

На основе проведенных работ разработана концепция построения высоковольтного синхронного сверхпроводникового генератора для ветроэнергетической установки, расположенной на морской платформе.

Сегодня для создания СП генераторов остаётся много нерешённых задач. Что касается оптимизации параметров кабеля, то первая и главная проблема - потери на переменном токе, которые снижают эффективность генераторов на больших скоростях вращения (в первую очередь это касается машин для военных) и препятствуют созданию полностью сверхпроводникового генератора. Вторая проблема - увеличение транспортных токов. Авторы [1] считают важным достижение порога 400 A/mm^2 для инженерного критического тока СП обмотки ротора. И хотя такие результаты уже достигнуты ($1,5 \text{ MA/cm}^2$ для покрытия в 2 мкм на никелевой ленте толщиной 70 мкм), реализация их на лентах большой длины представляет трудную задачу. Третья проблема - стабилизация системы при переходе сверхпроводника в нормаль-

ное состояние. И, наконец, стоимость ВТСП провода играет всё более существенную роль. Пока American Superconductor установила отпускную цену на 2G-провод своего производства в 100 долл./кАм [8], при том что для широкого применения генераторов она должна быть примерно в 10 раз меньше (см. таблицу). Ключ к решению проблемы, очевидно, кроется в развитии эффективных, надёжных и недорогих методов получения ВТСП проводов 2-го поколения.

Если верить оптимистичным прогнозам, мы стоим на пороге большого будущего силовых СП машин, в том числе и генераторов переменного тока. Например, глава Intermagnetics General Corporation (IGC) Карл Рознер считает, что эксплуатация СП генераторов высокой мощности ($\sim 1 \text{ ГВт}$) станет реальностью около 2020 года для НТСП, а в 2030 следует ожидать создания генераторов на ВТСП [9]. Вероятно, американские военные получают такие машины несколько раньше. Экономический анализ, опубликованный американскими авторами в 2002-м году, также предсказывает СП генераторам светлое будущее [10].

С.Самойленков

1. P.N.Barnes, M.D.Sumption, G.L.Rhoads, *Cryogenics* 2005, **45**, 670-686.
2. <http://www.electricity.doe.gov/documents/generator.pdf>
3. R.D.Blaugher, в «Power Applications of Superconductivity in Japan and Germany», *World Technology Evaluation Center Panel Report*, 1997 (<http://www.wtec.org/loyola/scpa/toc.htm>)
4. I.A.Glebov, V.N.Shaktarin, *IEEE Trans. Magnetics*, 1983, **19**, 541-544.
5. пресс-релиз EAS (http://www.advancedsupercon.com/pdf/press_release_EAS HTS_generator.pdf).
6. *Superconductor Week*, 2006, 20/02.
7. пресс-релиз Superpower ([http://www.igc.com/pdfs/SuperPower_2006_01_Title_III_Phase_3_Award_FINAL_PDF_1-4-06%20\(2\).pdf](http://www.igc.com/pdfs/SuperPower_2006_01_Title_III_Phase_3_Award_FINAL_PDF_1-4-06%20(2).pdf))
8. пресс-релиз AMSC (http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=807519&highlight)
9. C.H.Rosner, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2001, **11**, 39-48.
10. T.P.Sheahen, B.W.McConnell, J.W.Mulholland, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2002, **12**, 1784-1789.

ЗАРУБЕЖНЫЕ КОМПАНИИ

Trithor GmbH, Германия

Европейская компания Trithor GmbH основана в 1999 году и специализируется на производстве высококачественных ВТСП проводов, компонентов и систем для применений в электроэнергетике и в магнитах. Trithor обеспечивает ВТСП проводами

электроэнергетику, кораблестроение, наземный и надземный транспорт, медицину. Trithor поставляет потребителям:

1. ВТСП провода - основная продукция компании
2. Надежную изоляцию - фокус на промышленные требования
3. ВТСП катушки – как легко устанавливаемое изделие
4. ВТСП токовводы с низкими тепловыми потерями
5. Эффективное специальное оборудование: для улучшения промышленных процессов (индукционные нагреватели и устройство для вытягивания труб с применением ВТСП магнитов).

Trithor изготавливает и поставляет текстурированные Ni и Ni-5%W ленты для применения в качестве

Таблица 1. Параметры ТТ ВТСП BSCCO проводов:

Материал (фирменная марка – ТТ)	Материал ВТСП жил Материал матрицы	BSCCO 2223 Арматура из Ag сплав
Материал (фирменная марка - ТТ-gold)	Материал ВТСП жил Материал внутренней матрицы Материал внешней оболочки	BSCCO 2223 Ag:Au Жесткий Ag:Au сплав
Сверхпроводящие свойства	Критический ток	50, 60, 70, 80, 90 А (критерий 1 мкВ/см, 77 К, собственное поле)
Размеры	Ширина Толщина	4,0 мм 0,25 мм
Типичные механические свойства	Натяжение вдоль оси (95% сохранение I_c) Плоское изгибание, критический радиус (95% сохранение I_c)	> 210 МПа (77 К), 100 МПа (300 К) 35 мм (300 К)
Длина в одном куске		Максимум 1200 м
Электрическая изоляция	Материал Толщина изоляции	Фольга 4 мкм (400 В) 10 мкм (1кВ)

Токовводы

Токовводы – устройства, предназначенные для передачи электрического тока от приборов, находящихся при комнатной температуре к приборам при низкой (4-20 К) температуре. Обычно для этой цели используют токовводы из меди или бронзы. Однако, металлы с хорошей электропроводностью обычно обладают и высокой теплопроводностью, что приводит к тепловым потерям хладагента. Альтернативой металлическим являются ВТСП токовводы, позволяющие на порядок снизить теплопотери. ВТСП токовводы компании Trithor используются в широком диапазоне применений:

- в устройствах физики высоких энергий, например, в Большом адронном коллайдере (ЛНС) в ЦЕРНе;
- для ввода тока в ВТСП и НТСП магниты;
- в магнитных резонансных установках.

подложечного материала для изготовления YBCO ВТСП проводов второго поколения со следующими параметрами:

1. Длина ленты – до 100 м
2. Ширина ленты – 4 – 20 мм
3. Толщина ленты – 40-80 мкм
4. Неоднородность поверхности < 5 нм
5. Разориентация – типично 6°

Trithor производит методом «порошок-в-трубе» два типа коммерческих многожильных ВТСП BSCCO лент с высокими механическими характеристиками и качественной изоляцией:

- стандартные ТТ провода с внутренней арматурой (ТТ – фирменный знак для проводов компании Trithor);
- ТТ-gold провода, оптимизированные для низкой теплопроводности.

ВТСП токовводы обычно конструируют для работы в две стадии: сначала ток передается от комнатно-температурного устройства к устройству, находящемуся при промежуточной температуре (30-77 К), используя металлические провода, а затем от промежуточного устройства к устройству при 4 К, используя ТТ-gold провода компании Trithor. При этом теплопотери снижаются в 10 раз. Trithor поставляет два типа токоввода для низкотемпературной стадии – стержни с высокой компактностью и конструкцию «баттерфляй» с большой поверхностью. Токовводы Trithor имеют следующие преимущества для пользователя:

- отсутствие омических потерь – значительно сниженный теплоотвод
- большие контактные поверхности – дают низкое сопротивление контактов
- прекрасные механические свойства – жесткие и ударопрочные

- жесткая конструкция — легко устанавливать

- основаны на гибких ВТСП проводах с шунтом для тока.

Таблица 2. Спецификация на токовводы

Тип		Тепловые потери (64 - 4 К, собственное поле, длина – 245 мм)
100 А	Стержень	60 мВт
	Баттерфляй	110 мВт
250 А	Стержень	150 мВт
	Баттерфляй	200 мВт
500 А	Стержень	295 мВт
	Баттерфляй	345 мВт
750 А	Стержень	445 мВт
	Баттерфляй	525 мВт
1000 А	Стержень	590 мВт
	Баттерфляй	670 мВт

ВТСП магниты для протяжки металлических труб
Вытягивание – основной метод формовки металла при производстве труб различных размеров. В процессе вытягивания при протягивании через специальные шаблоны уменьшают диаметр труб до необходимого размера. При механическом вытягивании не исключаются повреждения и разломы труб. Отсюда интерес к бесконтактному вытягиванию с использованием электромагнитных сил. Этот революционный подход Trithor разрабатывает для Bültmann GmbH (www.bueltmann.com), производителя оборудования для промышленности. Технология основана на электромагнитных силах, генерируемых магнитами. В разрабатываемом устройстве LIMODRAW

магниты генерируют электромагнитную волну, действующую на трубы как механические силы, приводя к бесконтактному движению трубы. ВТСП магниты могут генерировать достаточно высокие поля, улучшая характеристики системы.

Устройство будет применимо в производстве медных, алюминиевых и бронзовых изделий. Технология LIMODRAW позволит увеличить скорости деформации, так как силы могут быть приложены как в тянущем, так и в толкающем направлении (вариант «тяги-толкая»). За счет больших линейных скоростей значительно возрастет производительность (по оценкам до 300%) процесса

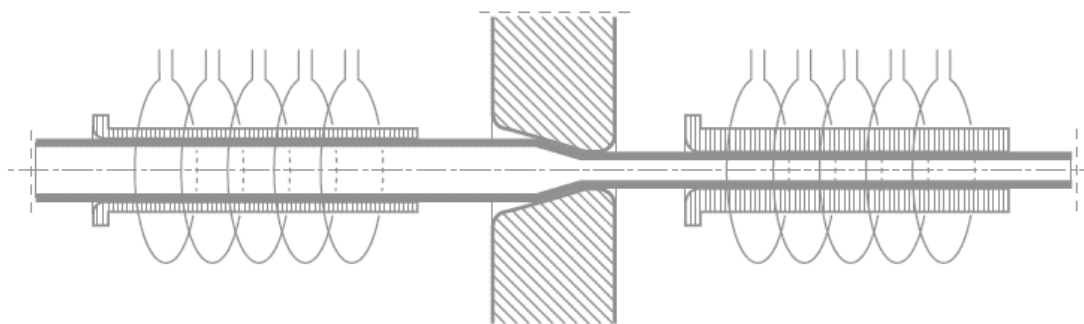


Рис. 7. Схема устройства для вытягивания металлических труб с использованием ВТСП магнитов

ВТСП индуктивный нагреватель для металлургической промышленности

Индукционный нагрев – стандартный процесс в металлургической промышленности, используемый при плавлении и сварке, например, в авиационной промышленности. При индукционном нагреве металличе-

ские части изделия экспонируются в электромагнитном поле. Стандартная мощность – в диапазоне 0,5 МВт до 2 МВт.

Trithor разрабатывает новый значительно более эффективный процесс индукционного нагрева при производстве меди, алюминия, бронзы, стали.

Таблица 3. Сравнение ВТСП и традиционных нагревателей для генерации 1 МВт тепла при производстве алюминия

Параметр	ВТСП индукционный нагреватель	Традиционный индукционный нагреватель
Стоимость 1 МВт нагревателя	1500000 евро	1500000 евро
Эффективность	> 90%	Около 55 %
Эксплуатационные расходы*	15000 евро	50000 евро
Температурная однородность	< 5°C	10°C
Площадь для размещения	20 м ²	200 м ²
Внешнее охлаждение	Только криокулер 0,008 МВт	Охлаждение водой 1 МВт
* 1 МВт, 7500 рабочих часов в год при стоимости электричества 0,04 евро/кВт·час		

ВТСП индукционные нагреватели поставяет компания Trithor and Bültmann GmbH по специальным заказам.

С.Корецкая, А.Чернышева

По материалам сайта www.trithor.com

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Что нового можно еще придумать в методе импульсного лазерного осаждения?

Достаточно много работ в последнее время выполняется на монокристаллических подложках с надеждой в будущем использовать полученные результаты в технологии 2G ВТСП. Конечно, такие надежды могут и не оправдаться, так как проблемы окисления металлической ленты и химического взаимодействия со слоем ВТСП можно игнорировать только до тех пор, пока эксперименты проводятся с оксидными монокристаллическими подложками. Тем не менее, красивые идеи заслуживают быть упомянутыми.

В совместной работе [1] сотрудников Univ. Cambridge (Англия) и Los Alamos Nat. Lab. (США) с участием Яна Эветта (памяти которого была посвящена последняя конференция EUCAS) для реализации высоких скоростей роста слоя ВТСП (авторами достигнуто значение ~ 120 мкм/час!) предложен гибридный процесс осаждения пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Как известно, метод жидкофазной эпитаксии обеспечивает быстрый рост пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (при правильном подборе материала подложки), но плотность критического тока в таких пленках невелика из-за отсутствия достаточного количества центров пиннинга. Чтобы включения другой фазы могли образовываться в матрице фазы ВТСП, необходимо изменить соотношение количеств твердой фазы и расплава при кристаллизации. Жидкой фазы должно быть мало – идеально, если она образует лишь тонкий слой на поверхности растущей пленки (при жидкофазной эпитаксии реализуется обратная ситуация – эпитаксиальная пленка кристаллизуется обычно из избытка жидкой фазы). При этом фазовый состав пленки эффективно контролируется температурой осаждения.

В эксперименте [1] само осаждение проводили методом импульсного лазерного распыления. Сначала на подложку наносили тонкую пленку, которая в условиях кристаллизации $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ находилась в жидкофазном состоянии (это достигается сильным обеднением состава мишени по Y – до 1 % мол.). Затем распыляли мишень с катионным составом, близким к стехиометрии $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Оптимальные условия роста отвечали температуре 870°C при $P(O_2)=100$ Па. При этом образовалась эпитаксиальная матрица $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с когерентными нановключениями Y_2O_3 (случай детально описанный в литературе по пленкам ВТСП еще лет десять назад). Полевые и ориентационные зависимости плотности критического тока, достигающего 1,2 МА/см² (77 К) в пленке толщиной 2,9 мкм, в целом, очень типичны для эпитаксиальных пленок, полученных методом лазерного осаждения, за исключением того, что эти параметры получали при скорости осаждения почти на 2 порядка более высокой, чем при традиционной технологии.

Другой способ контролируемого формирования нановключений в методе импульсного лазерного распыления предлагается в совместной работе исследователей из Dayton Res. Inst. и Air Force Res. Lab. (США) [2]. Авторы пытались преодолеть недостатки композитных мишеней (невозможность управления содержанием включений при использовании одной и той же мишени) или нескольких однофазных мишеней (ламельная форма включений). Для этого использовали мишень в виде диска, состоящего из секторов различных чистых фаз, например, большого сектора $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и маленького сектора Y_2BaCuO_5 (Y211). В ходе импульсного лазерного испарения мишень вращалась со скоростью нескольких десятков оборотов в минуту, что позволяло управлять как концентрацией, так и размером включений в пленке. При использовании секторных мишеней достигается значительное усиление пиннинга по сравнению с однофазными мишенями. Так, в поле 9 Тл при 65 К плотность критического тока в пленке толщиной 0,5 мкм возрастает в 10 раз. Увы, структурная характеристика полученных пленок оставляет желать лучшего. Сканирующая электронная микроскопия указывает на

наличие включений размером 10-20 нм, которые авторы считают ответственными за пиннинг и почему-то называют сферическими, хотя приводимые фотографии об этом не говорят. Химическая природа этих включений остается неизвестной. Но вероятно, это не Y211, так как кроме включений наблюдаются еще и многочисленный поры размером 100-200 нм, которые объясняются отсутствием когерентности структур $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и Y211. Вероятно, это надо понимать так, что эти поры возникают

над включениями Y211 в матрице $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. В целом, работа оставляет много вопросов. Например, а не лучше ли использовать сектор не из Y211, а из Y_2O_3 ? Как минимум, при этом не должно возникать пор, одни только когерентные нановключения, эффективность которых хорошо известна.

О.Горбенко

1. *Appl. Phys. Lett.* 2005, **87**, 252507
2. *Appl. Phys. Lett.* 2005, **87**, 262510

ВТСП КАБЕЛИ В СЕТЯХ

Таблица. Текущие и законченные проекты по ВТСП $Bi2223$ кабелям

Название проекта (Бюджет, млн. долл.)	Исполнители (Инвесторы)	Характеристики электросети	Конфигурация фаз	Поставщик ВТСП материала	Период испытаний
TEPCO (18)	Sumitomo Electric Industries	AC 66 кВ 1000 А 100 м	3-в-1	Sumitomo Electric Industries	2001-2002
Copenhagen	NKT (Danish Energy Authority)	AC 30 кВ 2000 А 30 м	1x3	NST	2001-2003
Southwire	Southwire (DoE)	AC 125 кВ 1250 А 30 м	1x3	Intermagnetic General Corp. (IGC)	2000-
Detroit	Pirelli (DoE)	AC 24 кВ 2400А 120 м	1x3	American Superconductor	10.2001-
Super-ACE	1. Furukawa Electric 2. CRIEPI (METI, NEDO)	AC 77 кВ 1000 А 500 м	1x1	-	2004-2005
Yunnan (43)	1. Innopower 2. InnoST 3. Shanghai Cable Works (Chinese Ministry of Science Technology, City of Beijing, Yunnan Province)	AC 35 кВ 2000 А 33,5 м	1x3	InnoST	4.2004-
DAPAS	1.LG cable 2.KERI 3. KIMM (S. Korean Ministry of Science and Technology)	AC 22,9 кВ 1250 А 75 м	3-in-1	American Superconductor	5-12.2004
Lanzhou	1. Chinese Academy of Science 2. Chang Tong Cable Co.)	AC 10,5 кВ 1500А 75 м	1x3	American Superconductor	2005-
KEPRI (2)	1. KEPRI 2. Sumitomo Electric Industries 3. KERI 4.KBSI 5. Universities (S. Korean government)	AC 22,9 кВ 1250 А 100 м	3-in-1	Sumitomo Electric Industries	2005-

Albany (26)	1. <i>SuperPower</i> 2. Sumitomo Electric Industries 3. BOC (DoE, NYSERDA)	AC 34,5 кВ 800 А 350 м	3-в-1	Sumitomo Electric Industries (SP*)	2005-
LIPA (30)	1. AMSC 2. Nexans 3. AirLiquide (DoE)	AC 138 кВ 2400 А 660 м	1x3	American Superconductor	2006-
Ohio (9)	1. Ultera 2. ORNL (DoE)	AC 13,2 кВ 3000 А 200 м	3-фазный коаксиальный	American Superconductor	2006-

AMSC – American Superconductor Corp., USA
 BOC - British Oxygen Company Ltd, UK
 CRIEPI – Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan
 DAPAS - Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity. Technology, Korea
 DoE – Department of Energy USA
 KBSI - Korea Basic Science Inst.
 KEPRI - Korea Electric Power Research Inst.
 KERI - Korea Electrotechnology Research Inst.
 KIMM - Korea Inst. of Machinery and Materials
 LIPA - Long Island Power Authority, USA

METI - Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan
 NEDO - New Energy Industrial Technology Development Organization, Japan
 NKT - Nordiske Kabel og Traadfabriker, Denmark
 NST - Nordic Superconductor Technologies, Denmark
 NYSERDA - New York State Energy Research and Development Authority, USA
 ORNL – Oak Ridge Nat. Lab., USA
 TEPCO - Tokyo Electric Power Company, Japan

Superconductivity Web21, 16.01.2006

Издатель ВНИИЭлектроэнергетики

(при поддержке ОАО «ФСК ЕЭС»)

Научный редактор *Н.А. Черноплеков*, член-корр. РАН,
 научный руководитель ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт»

Редактор *С.С. Иванов* ssi@iht.mpei.ac.ru

В подготовке выпуска принимали участие: *С. Корецкая* stk@issp.ras.ru;
А. Чернышова chak@newmail.ru; *О.Горбенко*, *Ю. Метлин*, *И.Руднев*, *С.Самойленков*

Верстка *И. Фурлетова*

Ответственный за тираж *Н. Морозова*