

Том 5 выпуск 6
ноябрь 2008

ЗАРУБЕЖНЫЕ ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

ВТСП технологии в Китае

Население 24-х провинций Китая на сегодняшний день составляет 1,3 миллиарда человек, интенсивное развитие промышленности и рост благосостояния населения требуют все большего количества энергоресурсов. Сегодня энергетические потребности страны на 70% обеспечиваются тепловыми электростанциями, работающими на угле, что неизбежно влечет за собой загрязнение окружающей среды. Основными задачами энергетики Китая является поиск высокотехнологичных способов получения, передачи, сбережения энергии, строительство экологически чистых электростанций, реконструкция существующих, строительство новых электрических сетей (на что до 2010 года уже выделено 123 млрд. USD). Решением многих из перечисленных проблем может стать использование ВТСП устройств. Компания American Superconductor (AMSC) уже развернула в Китае проект стоимостью 450 млн. USD по созданию преобразователей для ветрогенераторов. В целом, планируется увеличение суммарной мощности ветряных электростанций в Китае до 10 ГВт к 2011 году и до 120 ГВт – к 2020 г.

В Китае находится самая протяженная в мире линия электропередачи с рабочим напряжением 500 кВ, ее длина составляет 3107 км. В стадии разработки находятся высоковольтная ЛЭП переменного тока на напряжение 1000 кВ (5 ГВт) и длиной 1243 км, а также ЛЭП постоянного тока на 800 кВ (6,4 ГВт). Ожидается, что мощность, передаваемая между регионами Китая, будет расти в геометрической прогрессии: 25 ГВт в 2005 г., 55 ГВт в 2010 г., 100 ГВт в 2020 г. К 2009 г. на проектную мощность в 18 ГВт выйдут 26 гидрогенераторов на строящейся ГЭС Three Gorges Dam, что удовлетворит 1/9 часть общего энергопотребления страны.

В Китае регулярно проводятся различные международные конференции, посвященные проблемам электроэнергетики. Например, в июне 2008 года прошла международная конференция, посвященная исследованию свойств новых материалов, основной темой которой стали ВТСП провода на основе Bi-2223, а также новые (открытые в марте 2008 года) сверхпроводящие материалы на основе арсенидов железа – оксипниктиды. В мае этого года китайскими учеными были открыты новые соединения этой группы на основе Gd, Sm и Pr с критической температурой до 52 К.

Стремительно развивается промышленное производство ВТСП проводов. Работы над созданием Bi-2223 проводников в серебряной матрице ведутся в целом ряде научных центров Китая: Пекинском физическом институте Китайской академии наук, Исследовательском институте цветных металлов, Шанхайском университете, Университете электроники и технологии (г. Чэнду) и т.д. В течение 8 лет китайская компания InnoST производит ВТСП проводники на основе Bi-2223 в серебряной матрице в промышленных масштабах, годовой объем производства ВТСП материалов в Китае

И далее...

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Разработки 2G ВТСП в Японии, 2008 год 3

Технические характеристики ВТСП второго поколения 6

Сильноточные транспонированные ВТСП токонесущие элементы: разработки IRL и Karlsruhe 6

ВТСП УСТРОЙСТВА

Сверхпроводящие токоограничители резистивного типа в CESI RICERCA 8

уже достиг 300 км в год. Критический ток ВТСП лент InnoST (ширина ленты 4,2 мм) превысил 110 А и приближается к показателям лент производства компаний AMSC и Sumitomo. Ближайшая цель компании InnoST – улучшение технических характеристик ВТСП лент и сокращение издержек производства с тем, чтобы к концу 2009 г. достичь критического тока в 150 А при стоимости ВТСП проводника около 60 USD за килоампер-метр.

Усилия китайских технологов также направлены на разработку промышленной технологии производства оригинальных двусторонних ВТСП проводников 2-го поколения (рис. 1). На данный момент уже разработана технология изготовления двусторонних ВТСП длиной до 100 м с критическим током 103 А/см (для обеих сторон).

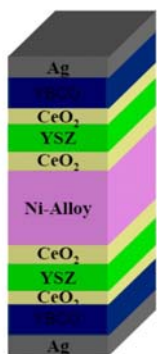


Рис. 1. Двусторонний ВТСП проводник 2-го поколения.

В Китае было успешно реализовано несколько проектов по созданию опытных образцов ВТСП кабелей. В 2002 году были начаты работы по созданию и прокладке трехфазного ВТСП кабеля на 35 кВ/121 МВА длиной 33,5 м (рис. 2). Кабель был изготовлен китайской компанией

InnoPower из ВТСП проводника на основе Bi-2223 производства InnoST.

Кабель состоит из нержавеющей формера, на который навиты два повива ВТСП ленты, внешний диаметр кабеля составляет 35 мм. Каждая фаза кабеля размещена в собственном криостате, кабель был выполнен по схеме с «теплым» диэлектриком. Гибкие криостаты поставила компания Nexans, их внешний и внутренний диаметры составляют 43 и 70 мм, соответственно. Жидкий азот прокачивается через полый формер (внутренний диаметр – 30 мм) и щель между ВТСП кабелем и внутренней стенкой гибкого криостата. Электрическая изоляция ВТСП кабеля – полиэтиленовая (XLPE), толщиной 11,9 мм. Масса погонного метра ВТСП кабеля составляет 9,2 кг, внешний диаметр - 112 мм. При прокладке кабель был изогнут под углом 90°. В 2004 году все работы по его созданию и прокладке были закончены, ВТСП кабель бесперебойно работает по настоящее время. Потери на переменном токе в кабеле составляют около 30 Вт на фазу (измерены при токе 1500 А). В ходе эксплуатации кабеля произошло несколько аварий, почти все они были связаны с системой криогенного обеспечения. Периодичность обслуживания системы криогенного обеспечения ВТСП кабеля составляет 6 месяцев.

Другой кабельный проект – трехфазный ВТСП кабель Gansu Changtong длиной 75 м, который был изготовлен в Электротехническом институте Китайской академии наук (ИЕЕ) из Bi-2223 проводов в

серебряной матрице производства компании AMSC. Этот кабель также был выполнен по схеме с теплым диэлектриком, каждая фаза размещалась в индивидуальном гибком криостате. Рабочее напряжение и ток кабеля составили 10,5 кВ и 1,5 кА, соответственно. ВТСП кабель успешно эксплуатируется в сети с 2004 года.



Рис. 2. Трехфазный ВТСП кабель InnoPower.

Особого внимания заслуживает разработанный в ИЕЕ совместно с китайской компанией Terbian Electric ВТСП трансформатор мощностью 630 кВА (10,5 кВ/400 В), изготовленный из ВТСП на основе Bi-2223 в серебряной матрице производства AMSC (рис. 3). Трансформатор выполнен по схеме с «теплым» магнитопроводом, его выполненные по галетной схеме обмотки охлаждаются жидким азотом, что существенно упрощает как его конструкцию, так и эксплуатацию. Каждая из фаз трансформатора заключена в индивидуальный диэлектрический криостат, через центр которого проходит магнитопровод.



Рис. 3. Трехфазный ВТСП трансформатор ИЕЕ/Terbian Electric 10,5 кВ/400 В, 630 кВА.

Компания InnoPower разработала, изготовила и провела испытания ВТСП токоограничителя с насыщенным магнитопроводом с номинальной мощностью 90 МВА и рабочим напряжением 35 кВ. Токоограничитель (рис. 4) установлен на той же подстанции, что и ВТСП кабель InnoPower на 35 кВ и 121 МВА. Впечатляют габариты ВТСП катушки

подмагничивания токоограничителя: диаметр – 1340 мм, высота – 880 мм, расход ВТСП проводника - 17,6 км! Конструкция и технические характеристики токоограничителя InnoPower в целом аналогичны токоограничителю, недавно разработанному компанией Zenergy.

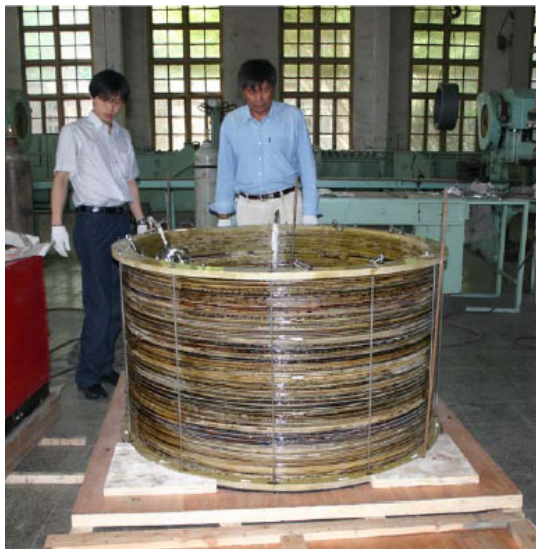


Рис. 4. ВТСП токоограничитель с насыщенным магнитопроводом InnoPower.

Стоит обратить внимание, что токоограничители с насыщенным магнитопроводом Zenergy и InnoPower отличаются чрезмерными массогабаритными показателями (масса токоограничителя InnoPower составляет 27 тонн) и значительно более слабым, чем у ВТСП токоограничителей резистивного типа, ограничением токов короткого замыкания. Ограничение ударного тока при использовании токоограничителя InnoPower составило всего 50%, тогда, как токоограничители резистивного типа на базе ВТСП проводников 2-го поколения способны ограничивать ударный ток намного более эффективно. Основной проблемой токоограничителей с насыщенным магнитопроводом является возникновение наведенных токов в цепи подмагничивания, что резко ухудшает токоограничивающие свойства и может привести к переходу ВТСП катушки подмагничивания в нормальное состояние (подробно об особенностях токоограничи-

телей с насыщенным магнитопроводом сообщалось в “Сверхпроводниках для Электроэнергетики”, т. 4, № 4). Для борьбы с наведенными токами специалисты InnoPower разработали схему быстрого разряда катушки подмагничивания, включающую в себя ключ на IGBT транзисторах на 6,5 кВ и 300 А, а также разрядное сопротивление на основе окиси цинка. Так как разряд катушки происходит за время около 5 мс, а она обладает значительной индуктивностью, то на ней возникает напряжение до 6 кВ, что накладывает жесткие требования на диэлектрические характеристики изоляции. Дальнейший рост мощности и рабочего напряжения ВТСП токоограничителей с насыщенным магнитопроводом неизбежно приведет к росту тока подмагничивания и перенапряжений при разряде катушки подмагничивания. Компанией InnoPower совместно с Tianjin Electric Power Corporation и Tianjin M&E Industry Holding Group начаты работы по созданию высоковольтного ВТСП токоограничителя с насыщенным магнитопроводом на 220 кВ и 1200 А, который будет установлен в муниципальной сети города Тяньцзинь в 2009 г.

Помимо перечисленных выше ВТСП изделий в Китае ведутся работы над целым рядом ВТСП электротехнических устройств, среди них: судовой гребной электродвигатель мощностью 365 кВт, разрабатываемый совместно с японской компанией Fuji; ВТСП токоограничитель резистивного типа на 10 кВ и 1,5 кА; ВТСП индуктивные накопители энергии на 35 кДж и 1 МДж; магнитные подвесы для транспорта и т.д. В заключение можно добавить, что в последние годы китайские разработки в области высоких технологий находятся на подъеме, интерес ученых и инженеров к огромным возможностям, которые открывают ВТСП технологии, для электроэнергетики, постоянно растет.

Д.И. Шутова, А.Ю. Коваленко, И.Л. Иванова

1. D.Peterson, Department of Energy's High Temperature Superconductivity Program Peer Review 2008.

2. Y.Xin et al., CIGRE 2008, D1-101.

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ **Разработки 2G ВТСП в Японии, 2008 год**

О достижениях японцев в области создания ВТСП-лент 2-го поколения наш бюллетень уже писал в 2006-м году (том 3, выпуски 2 и 5). Год назад подошла к концу 5-летняя национальная программа по созданию технологии ВТСП-лент 2-го поколения. Японцы подводят её итоги.

Заявлено, что все поставленные в программе цели выполнены (табл. 1). Так, в феврале этого года компания Fujikura сообщила о получении ВТСП-ленты длиной 503,5 м с критическим током 349,6 А/см. Одновременно это достижение было мировым рекордом по производству $I_c \cdot L$. Для получения столь высоких результатов использовались до-

рогостоящие высоковакуумные методы: с помощью IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) на подложку из хастелля осаждали $Gd_2Zr_2O_7$, а затем, методом PLD (Pulsed Laser Deposition) – CeO_2 , слой ВТСП осаждали также при помощи PLD (рис. 1). Для ускорения процесса лазерного осаждения использовались несколько лазерных пучков и многократное прохождение ленты через зону осаждения, из-за чего японцы называют его MPMT-PLD (multi-plume multi-turn). Надо заметить, что заявленная оценка себестоимости менее 12 йен/А*м, скорее всего, является заниженной (сегодня это соответствует 122 долл/кА*м, что дешевле даже американской ленты). Впрочем, ВТСП-ленты 2-го поколения в Японии пока никто не продаёт.

Для снижения стоимости производимых ВТСП-лент в Японии параллельно исследуются несколько путей:

- 1) применение химических методов осаждения (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) и Metal-Organic Decomposition (MOD));
- 2) применение текстурированной металлической подложки (технология Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates (RABiTS));
- 3) использование быстрого процесса IBAD MgO , аналогичного используемому американской компанией SuperPower.

Таблица 1. Цели японского национального проекта по созданию технологии ВТСП проводов 2-го поколения в 2003-2007 гг.

Стоимость, иен/А*м	Провод с высоким I_c	Провода, оптимизированные по стоимости	
	≤ 12 (77 К, 0 Тл)	≤ 8 (77 К, 0 Тл)	≤ 3 (демонстрация выполнимости)
Технологический процесс	YBCO(PLD)/GZO(IBAD)	YBCO(MOD)/GZO(IBAD)	RBCO/MgO (IBAD) или RABiTS
Длина, м	≥ 500		≥ 50
Критический ток, А/см	≥ 300 (77 К, 0 Тл)		≥ 200 (77 К, 0 Тл)
	≥ 30 (77 К, 3 Тл)	---	---
Скорость получения, м/ч	≥ 5	≥ 5	---
Команда	Fujikura, SRL	SWCC, SRL	SRL, SWCC, Sumitomo, Chubu

SRL – Superconductivity Research Laboratory, SWCC = Showa Electric Cables.

Японцы активно разрабатывают подходы к созданию эффективных центров пиннинга (рис. 2, см. также “Сверхпроводники для Электроэнергетики” т. 3 № 3 и т. 4 № 1). Одним из наиболее перспективных подходов сегодня является получение ком-

позитов ВТСП с внедрёнными “наноклонками” фазы цирконата бария ($BaZrO_3 = BZO$); такую структуру японцы метко назвали “бамбуковой”. Получение методом PLD толстых плёнок (до 5 мкм) с включениями BZO позволило достичь высоких значений тока 135 А/см при 3 Тл (В//с).

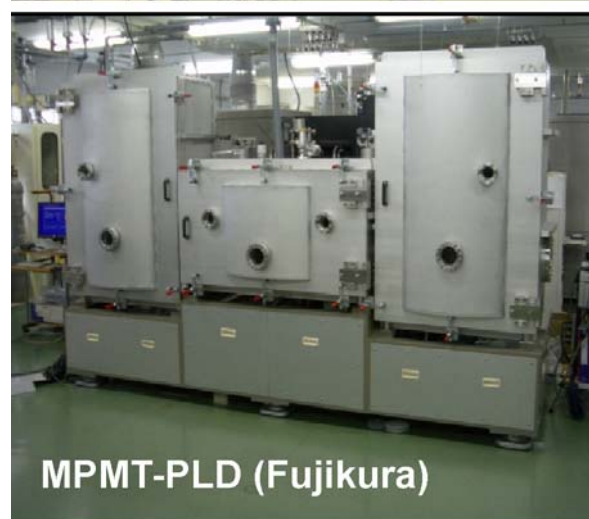


Рис. 1. Японское оборудование для осаждения буферных слоев и слоев ВТСП, рассчитанное на изготовление до 500 м провода.

Очень важно, что внедрение наноклонок BZO позволяет существенно повысить критток при В//аб, что делает критический ток менее чувствительным

к направлению поля. Сообщается также, что улучшения токонесущих характеристик удалось добиться благодаря применению обеднённых по барии составов мишени для PLD (например, $GdBa_{1.8}Cu_3O_x$) и соответствующих растворов для MOD. К сожалению, никаких материаловедческих объяснений такого влияния не приводится.

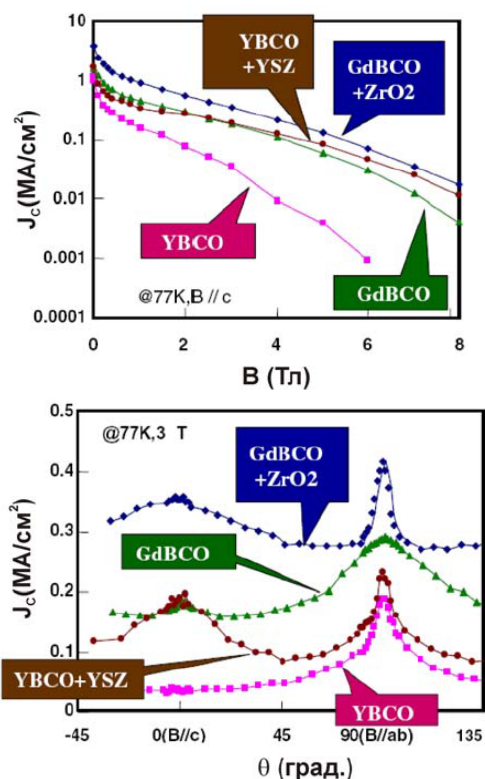
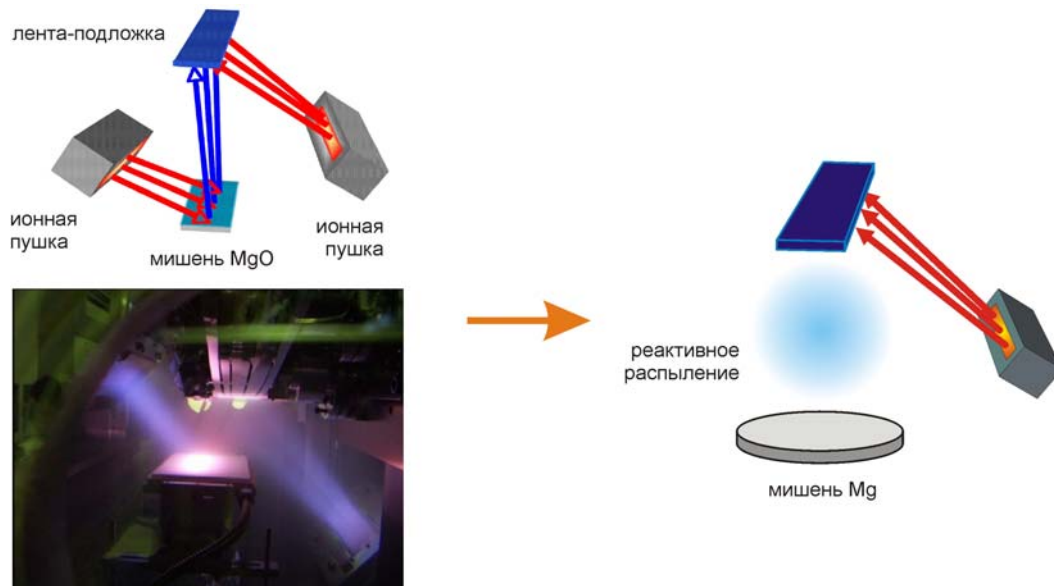


Рис. 2. Токонесущие характеристики плёнок RBCO (метод получения – PLD) во внешнем магнитном поле. Добавка ZrO_2 приводит к образованию в матрице сверхпро-

Интересные результаты сообщаются компанией Sumitomo. Напомним, что там разрабатывается структура $HoBCO/CeO_2/YSZ/CeO_2/NiW$, в которой ВТСП получают посредством PLD, а буферные слои – распылением. Заменяв $HoBCO$ на $GdBCO$, компания повысила плотность критического тока в проводах с 1 до $2,5 MA/cm^2$. Применение вместо сплава NiW биметаллических текстурированных лент с подавленным за счёт легирования магнетизмом (т.н. clad-type tapes) позволило снизить транспортные потери на переменном токе в 3 раза, сделав их в этом отношении сопоставимыми с лентами из хастеллоя.

Исследователи в SRL успешно освоили IBAD в применении к MgO (рис. 3). Этот процесс, разработанный в Лос Аламосе и применяемый сегодня компанией SuperPower, выгодно отличается от IBAD YSZ (EHTS) и IBAD GZO (Fujikura) по производительности. Дело в том, что оксид магния хорошо текстурируется уже при очень малой толщине слоя (10 нм), в то время как производные оксида циркония получают с требуемой текстурой только при толщинах 1 мкм и более. В SRL скорость получения первого буферного слоя удалось увеличить с 1 до 24 м/ч! Получаемый слой оксида магния обладает превосходной текстурой с углом разориентации всего $2-4^\circ$. Японцы разработали также более простой и экономичный подход с реактивным распылением MgO . В этом случае для осуществления процесса нужна только одна ионная пушка. С использованием такого подхода получены образцы с криттоком более $200 A/cm$.



водника наноразмерных колонок $BaZrO_3$.

Рис. 3. Процесс IBAD MgO . Осаждение оксида ведётся при ионной бомбардировке под определённым углом. Размер ионной пушки в SRL $22*6 cm^2$. Справа: альтернативный, более экономичный, подход с одной ионной пушкой.

Летом этого года в Японии стартовал новый национальный ВТСП-проект МРАСС, Materials and Power Application of Coated Conductor. Проект рассчитан

на 5 лет. Он предполагает разработку производства ВТСП-провода 2-го поколения в количестве 10-20 км в год. Наличие собственного ВТСП-провода

должно позволить японцам к 2012-2013 гг. реализовать запланированные пилотные проекты: СПИНЭ на 2 МДж, трансформатор мощностью 2 МВА и кабели 66 кВ-5кА и 275кВ-3кА.

С.В. Самойленков

1. Y. Yamada, "Global Progress in HTS, Japan Update", Department of Energy's High Tem-

perature Superconductivity Program Peer Review 2008.

2. Y. Shiohara et al., *Physica C*, **468**, 1498 (2008).
3. Y. Shiohara et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **21**, 034002 (2008).

Технические характеристики ВТСП второго поколения

Организация/ Страна		Метод получения	Длинные образцы			Короткие образцы
			I_c , А/см-ширины	L, м	$I_c * L$, А*м	I_c^{max} , А/см (J_c , МА/см ²)
SuperPower	USA	YBCO (MOCVD) – MgO (IBAD)	227	1030	233810	833 (2,44)
			302	630	190260	
Fujikura	Japan	GdBCO (PLD) – GZO (IBAD)	350	504	176023	540 (2,2)
SRL	Japan	YBCO (PLD) – GZO (IBAD)	213	245	52185	48 (1,2)
Sumitomo	Japan	HoBCO (PLD) – NiW (RABiTS)	205	200	41000	316 (1,8)
SWCC	Japan	YBCO (MOD) – GZO (IBAD)	300	500	150200	370 (2,5)
AMSC	USA	YBCO (MOD) – NiW (RABiTS)	350	94	32900	560 (4,0)
EHTC	Europe	YBCO (PLD) – YSZ (IBAD)	253	100	25300	574 (3,6)
Chubu	Japan	YBCO (MOCVD) – GZO (IBAD)	215	157	33755	294 (1,6)
SRL	Japan	YBCO (MOD) – GZO (IBAD)	250	56	14000	735 (2,4)
KERI	Korea	YBCO (EDDC) – MgO (IBAD)	305	27	8100	500 (2,3)

1. Y. Shiohara, "Coated Conductor Development and its Applications in Japan", *International Workshop on Coated Conductors for Applications (CCA 2007)*, Jeju, Korea.
2. Y.-Y. Xie et al., "Status of 2G HTS Wire Technology Development and Manufacturing at SuperPower", *International Symposium on Superconductivity (ISS 2008)*, Tsukuba, Japan.
3. Y. Yamada, "Global Progress in HTS, Japan Update", Department of Energy's High Temperature Superconductivity Program Peer Review 2008, Arlington, USA.

Сильноточные транспонированные ВТСП токонесущие элементы: разработки IRL и Karlsruhe

Новозеландская компания Industrial Research Limited (IRL) уже несколько лет активно занимается

разработками различных ВТСП устройств, о чем уже рассказывалось в одном из предыдущих номеров нашего бюллетеня (т. 5, № 2). Несколько месяцев назад Королевское научное общество Новой Зеландии присудило медаль Купера компании IRL за работы по разработке технологии производства ВТСП транспонированных токонесущих элементов типа Roebel (рис. 1) с низким уровнем потерь на переменном токе. Медаль Купера вручается Королевским Научным Обществом Новой Зеландии раз в 2 года за лучшее изобретение в области физики и инженерии. Предпочтение отдается проектам, которые могут принести прямые выгоды экономике страны.

ВТСП токонесущий элемент типа Roebel был изготовлен путем разрезания стандартного ленточного ВТСП проводника 2-го поколения шириной 40 мм производства компании American Superconductor

(AMSC) на 10 отдельных зигзагообразных полосок шириной по 2 мм, которые затем изолировались и свивались в одной плоскости. Перед разрезанием на исходный ВТСП проводник (с одной стороны или с обеих сторон) наносилось медное стабилизирующее покрытие толщиной от 25 до 50 мкм. Использование максимально широкого исходного ВТСП проводника позволило минимизировать неизбежные потери дорогостоящего материала.

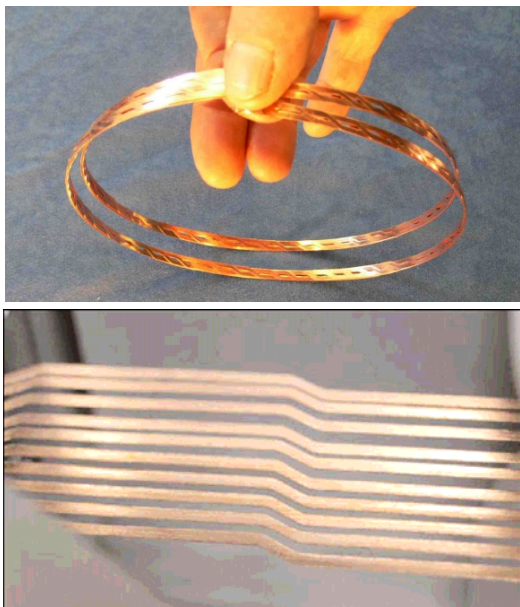


Рис. 1. ВТСП транспонированный токонесущий элемент и его отдельные полоски.

Высокая стоимость ВТСП материалов 2-го поколения требовала использования методов резки, которые были бы промышленно доступными и гарантировали бы стабильно высокое качество конечного продукта. Лазерная резка была отвергнута, так как она не позволяла получать ВТСП полоски с достаточной скоростью без ухудшения критических свойств проводника. Специалисты компании IRL считают механическую резку ВТСП проводников 2-го поколения наиболее подходящей для использования в промышленных масштабах.

Измерения потерь на переменном токе с частотой 60 Гц при температуре 77 К для различных образцов ВТСП транспонированных токонесущих элементов показали двукратное снижение потерь на переменном токе по сравнению с параллельно соединенными ВТСП лентами 2-го поколения шириной 4 мм. Критический ток изготовленных компанией IRL ВТСП токонесущих элементов зависит от качества ВТСП полосок и достигает 400 А. Сравнительно низкий критический ток обусловлен двумя причинами: неравномерностью критических свойств по ширине исходного проводника производства AMSC – по краям ВТСП ленты критический ток обычно заметно ниже, чем в центре, а также особенностями технологии резки – ширина ВТСП полоски на зигзаге сокращается с 2 мм до 1,8 мм. В будущем компания IRL планирует изменить технологию резки таким

образом, чтобы ширина ВТСП полосок была постоянной.

Специалисты компании IRL провели расчет методом конечных элементов механических напряжений ВТСП токонесущих элементов в процессе кабелирования и эксплуатации. Показано, что механические напряжения в проводнике можно уменьшить как за счет увеличения шага скрутки, так и путем увеличения ширины полоски. Механические напряжения в транспонированном токонесущем элементе также сильно зависят от ширины области перекрытия полосок.

Присуждение компании IRL медали Купера еще раз подтвердило, что транспонированные ВТСП токонесущие элементы найдут широкое применение в электродвигателях, генераторах, трансформаторах и других ВТСП устройствах, благодаря значительному снижению уровня потерь на переменном токе. Компания IRL уже заключила контракт с Siemens о поставке транспонированных токонесущих элементов для прототипа ВТСП генератора.

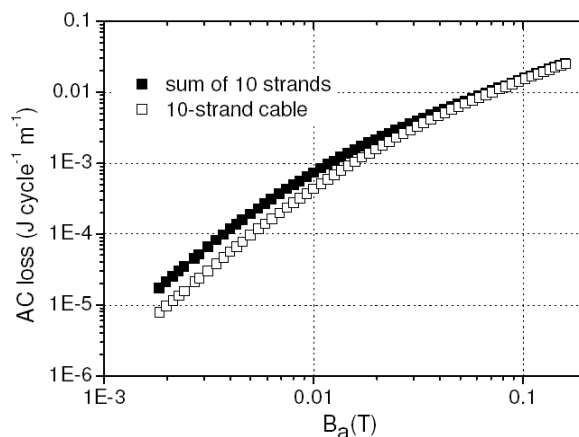


Рис. 2. Сравнение потерь на переменном токе в транспонированном токонесущем элементе IRL и в параллельно соединенных ВТСП лентах.

В немецком научном центре Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) из ВТСП лент 2-го поколения производства компании SuperPower был изготовлен модельный транспонированный токонесущий элемент типа Roebel длиной 1,1 м с критическим током в 2,63 кА, что на сегодня является мировым рекордом для данного типа ВТСП проводников. Измерения критического тока проводились в собственном поле при температуре 77 К по критерию 5 мкВ/см. Предыдущий рекорд критического тока для транспонированных ВТСП токонесущих элементов также принадлежит FZK: в 2006 году был изготовлен и успешно испытан токонесущий элемент с критическим током 1,02 кА. Короткий образец ВТСП транспонированного токонесущего элемента длиной 1,1 м с 6 узлами скрутки позволяет изучить перераспределение токов между жилами, стабильность к различным возмущениям, и является прекрасным модельным образцом для отработки тех-

нологии создания будущих длинномерных ВТСП транспонированных токонесущих элементов.

Для изготовления токонесущего элемента использовалась лента со стабилизирующим медным покрытием шириной 12 мм и критическим током в 299 А/см, что в 2 раза выше, чем у лент из которых был изготовлен предыдущий токонесущий элемент. Пакет из трех ВТСП лент 2-го поколения совместно разрезался на зигзагообразные полоски шириной по 5 мм каждая, затем из 45 отдельных полосок был собран транспонированный токонесущий элемент.

Немецкий FZK и новозеландская IRL практикуют различные подходы к резке и каблированию. В отличие от IRL специалисты FZK считают наиболее перспективной не механическую, а лазерную резку исходной ВТСП ленты. В процессе резки по схеме FZK значительно больше дорогостоящего ВТСП материала уходит в отходы, однако один из краев исходной ВТСП ленты остается нетронутым, что уменьшает риск повреждения проводника в ходе резки. Следует иметь в виду, что выбор технологий обработки во многом определяется механическими свойствами используемых ВТСП лент, которые у проводников производства AMSC (IRL) и SuperPower (FZK) сильно отличаются друг от друга. Производство длинномерных транспонированных ВТСП токонесущих элементов в FZK планируют начать уже в 2009 г.

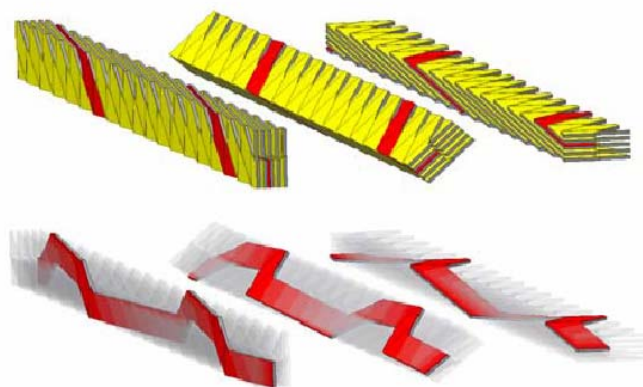


Рис. 3. Схема транспонированного ВТСП токонесущего элемента FZK.

Транспонированные ВТСП токонесущие элементы могут найти применение в целом ряде электротехнических устройств, таких как: трансформаторы, электродвигатели, генераторы и др., где требуются высокие рабочие токи, низкий уровень потерь на переменном токе и хорошие механические свойства. Представители FZK настроены оптимистично и заявляют, что путем увеличения числа полосок и шага скрутки скоро удастся изготовить транспонированный ВТСП токонесущий элемент с критическим током в 5 кА при температуре 77 К. В далекой перспективе ожидается, что критические токи транспонированных ВТСП токонесущих элементов достигнут десятков килоампер, что сделает возможным их использование в магнитных системах

термоядерного реактора (например, в проекте DEMO).

Д.И. Шытова

1. *Superconductor Week*, 22, n. 17, 6 (2008).
2. *Superconductor Week*, 22, n. 17, 1 (2008).
3. N.J. Long et al., *Journal of Physics: Conference Series*, 97, 012280 (2008).
4. <http://www.ivsupra.de/content/view/91/73>.

ВТСП УСТРОЙСТВА

Сверхпроводящие токоограничители резистивного типа в CESI RICERCA

Итальянский исследовательский центр CESI RICERCA (CR) – создал и успешно испытал несколько опытных образцов сверхпроводящих токоограничителей резистивного типа на основе Bi-2223 проводников в серебряной матрице, а также MgB₂ проводников. Согласно заявлениям специалистов CR сверхпроводящие токоограничители резистивного типа привлекательны по целому ряду причин: простоте конструкции, отсутствию импеданса в номинальном режиме работы, а также из-за того, что они не оказывают влияния на качество напряжения и тока в сети. ВТСП проводники на основе Bi-2223 в серебряной матрице были выбраны по причине их доступности и сравнительно низкой цены (хотя по мнению редактора, все преимущества, обусловленные низкой ценой Bi-2223, проводников компенсируется их низким удельным сопротивлением – количество ВТСП проводника на основе Bi-2223, необходимое для создания токоограничителя, будет в несколько раз выше, чем в случае использования пока более дорогих ВТСП проводников 2-го поколения). Проводники на основе MgB₂, в силу их предполагаемой дешевизны и хороших критических свойств, считаются в CR наиболее подходящим материалом для будущих сверхпроводящих токоограничителей резистивного типа. По мнению специалистов CR, использование в токоограничителях резистивного типа дешевых сверхпроводников на основе MgB₂ в сочетании с системой криогенного обеспечения на жидком неоне выгоднее, чем использование дорогих ВТСП проводников 2-го поколения, охлаждаемых жидким азотом.

Для оценки технических характеристик и возможностей сверхпроводящих токоограничителей резистивного типа были разработаны и испытаны несколько опытных образцов: трехфазный ВТСП токоограничитель на основе Bi-2223 проводников в серебряной матрице с номинальной мощностью в 1 МВА и рабочим напряжением 2,2 кВ, два модельных трехфазных ВТСП токоограничителя на 200 кВА и 400 В (также из Bi-2223 проводника) и однофазный сверхпроводящий токоограничитель на основе MgB₂ ленточных проводников.

В ходе испытаний ВТСП токоограничителя с номинальной мощностью в 1 МВА имитировалось ко-

роткое замыкание фазы на землю, а также межфазное короткое замыкание, как для заземленной, так и для изолированной нейтрали. Ударный ток без ВТСП токоограничителя достигал 15440 А, использование токоограничителя позволило снизить ударный ток до 2000 - 3100 А. Фазы ВТСП токоограничителя были изготовлены из различных ВТСП проводников, поэтому глубина ограничения тока короткого замыкания различными фазами отличалась. Длительность короткого замыкания составляла от 30 до 100 мс. Рабочая температура ВТСП токоограничителя в 65 К поддерживалась при помощи криокулера производства Stirling Cryogenics с холодопроизводительностью в 750 Вт, что позволило проводить длительные испытания без подлива жидкого азота. Избыточное давление в криостате ВТСП токоограничителя могло достигать 3 бар, однако, в ходе испытаний в криостате поддерживалось давление не выше чем 1 бар.

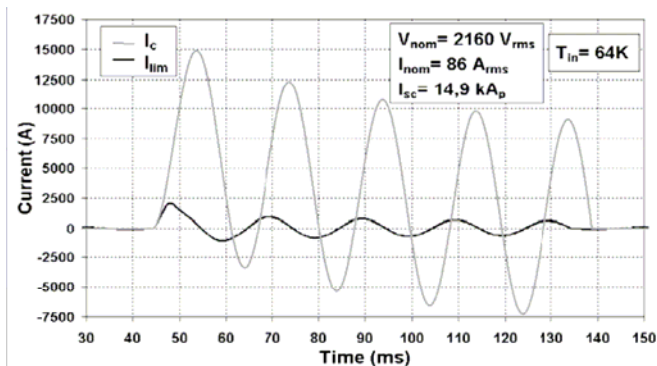


Рис. 1. Трехфазный ВТСП токоограничитель на 1 МВА и 2,2 кВ. Короткое замыкание в цепи с ВТСП токоограничителем и без него.

Трехфазные модельные ВТСП токоограничители на 200 кВА и 400 В предназначались для отработки технических решений которые были впоследствии использованы в токоограничителе на основе MgB_2 , на них также исследовалось влияние нагрева ВТСП проводника на процесс ограничения тока короткого замыкания. Конструктивно модельные ВТСП токоограничители представляли собой безиндуктивные катушки со слоевой намоткой в два или в четыре слоя намотанные на стеклотекстолитовых каркасах. Слои ВТСП секций токоограничителя коммутировались между собой таким образом, чтобы суммарная индуктивность была минимальной. При монтаже в криостате отдельные фазы ВТСП токоограничителя размещались либо коаксиально, либо Y-образно. В качестве ВТСП проводника использовались Bi-2223 ленты в серебряной матрице производства American Superconductor, чей критический ток в собственном поле составил 145 А при температуре 77 К и 245 А при 65 К. Перед

изготовлением модельных ВТСП токоограничителей было проведено детальное математическое моделирование переходных процессов в них во время короткого замыкания.

Модель однофазного сверхпроводящего токоограничителя была изготовлена из многоволоконного ленточного проводника на основе MgB_2 производства Columbus Superconductors, из которого был создан токоограничивающий элемент в виде безиндуктивной катушки со слоевой намоткой. До рабочей температуры в 27 К токоограничитель охлаждался при помощи двухступенчатого криокулера производства Stirling Cryogenics, в качестве хладагента использовался жидкий неон. Критический ток коротких образцов сверхпроводящих лент на основе MgB_2 составил около 225 А, измерения производились в собственном поле сверхпроводника при температуре 30 К. Сечение сверхпроводящих лент составляло $0,35 \times 3,8 \text{ мм}^2$. Для тепловой стабилизации в конструкцию ленточного проводника была введена медная сердцевина, окруженная волокнами из MgB_2 . Наличие медного стабилизатора гарантирует, что выделяющееся при локальном разогреве тепло будет эффективно отводиться в хладагент, предотвращая образование горячих точек и перегорание ленты. Для снижения потерь на переменном токе поперечное сопротивление ленточного сверхпроводника было увеличено путем заключения медного стабилизатора в никелевую оболочку. Чтобы предотвратить взаимную диффузию меди и никеля, волокна из MgB_2 были покрыты диффузными барьерами из железа.

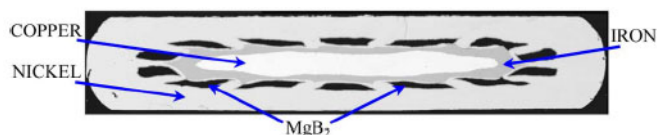


Рис. 2. Сечение ленточного проводника на основе MgB_2 .

Рабочее напряжение токоограничителя на основе MgB_2 составляло 400 В при номинальном токе около 200А. В ходе испытаний токоограничителя были получены зависимости между длительностью процесса короткого замыкания, значением перегрева MgB_2 ленты и ростом давления внутри криостата, вызванного испарением жидкого неона. Длительность короткого замыкания составляла от 30 до 100 мс. Сверхпроводящая лента на основе MgB_2 нагревалась до температуры 85 К при длительности короткого замыкания в 100 мс. Ударный ток без токоограничителя составлял 5 кА, токоограничитель сократил значение ударного тока до 1860 А, а установившийся ток короткого замыкания уменьшился до 1064 А.

В 2009 планируется изготовить и установить на подстанции в окрестностях Милана ВТСП токоограничитель с рабочим напряжением 10 кВ и мощностью 15 МВА. ВТСП проводник на основе Bi-2223 в серебряной матрице для него поставит

Sumitomo Electric Industries. Токоограничители большой мощности на основе MgB_2 и ВТСП проводников 2-го поколения пока находятся на стадии разработки проектов и технико-экономического обоснования. Все работы по данному проекту финансируются Министерством экономического развития Италии. Длительность проекта составляет 3 года, бюджет проекта – несколько миллионов евро.

А.А. Никонов, В.И. Щербаков

1. *L. Martini et al., J. of Phys.: Conf. Ser., 43, 925 (2006).*
2. *R.B. Dalessandro et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, 1776 (2007).*
3. *Superconductor Week, 22, n. 18, 5 (2008).*

<http://perst.isssph.kiae.ru/supercond>

Издатель РНЦ «Курчатовский институт»

Институт сверхпроводимости и физики твердого тела
(при поддержке ОАО «НТЦ электроэнергетики»
и Фонда «Научный потенциал»)

Научный редактор *В.С. Круглов* зам. директора ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт»

Редакторы *В.С. Высоцкий* vysotsky@gmail.com, *В.И. Щербаков* sherby@isssph.kiae.ru

Ответственный редактор: *М.П. Смаев* perst@isssph.kiae.ru

В подготовке выпуска принимали участие: *И.Л. Иванова, А.Ю. Коваленко, Т.С. Мартынова,*

А.А. Никонов, С.В. Самойленков, А.К. Чернышева, perst@isssph.kiae.ru, *Д.И. Шутова*

Верстка *И.Л. Фурлетова*