



Том 6 выпуск 2
апрель 2009

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Перспективы снижения стоимости ВТСП проводов второго поколения

Современные керамические высокотемпературные сверхпроводники представляют собой весьма «капризный» материал с точки зрения возможности крупномасштабного производства проводов. Они хрупки, демонстрируют слабую стойкость к химически агрессивным средам, требуют создания специфической микроструктуры и высокой степени текстуры в материале – все это обуславливает достаточно сложную многоэтапную технологию производства проводов, и, соответственно, неприемлемо низкую производительность и высокую стоимость производства.

Выражение цены в единицах «доллар за килоампер-метр» (\$/кА-м) является общепринятой мерой, которой может оцениваться удельная стоимость ВТСП провода (впрочем, как и всех остальных, например, традиционных медных или проводов на основе низкотемпературных сверхпроводников).

Анализ последних отчетов (см., например, материалы международного семинара *International workshop on coated conductors for applications (CCA-2008)* [1]) ведущих производителей ВТСП проводов позволяет сделать определенные выводы о перспективах и пределах снижения стоимости этой продукции.

Большинство экспертов соглашаются, что широкое коммерческое применение ВТСП провода будут иметь только при условии снижения их цены ниже стоимости меди для силовых кабелей (порядка \$30-60 за кА-м), т.е. в 5-20 раз меньше, чем сейчас. В этом случае можно надеяться «запустить» рынок, а дальнейшее снижение цены пойдет вслед за спросом и, следовательно, производством. Достичь этого результата можно двумя путями: во-первых, это снижение себестоимости единицы длины (метра) провода, в том числе за счет роста объема производства; во-вторых, повышением величины критического тока.

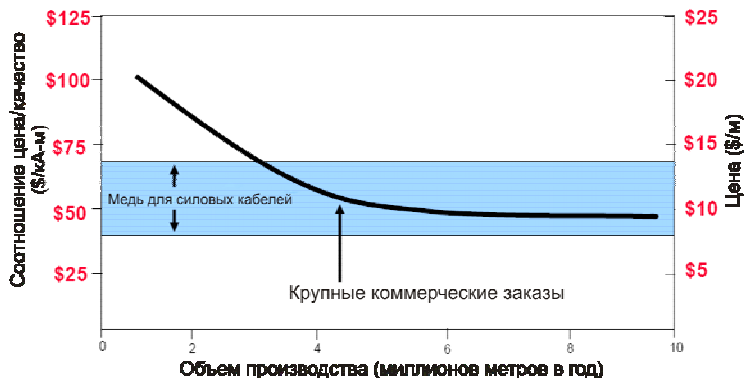


Рис. 1. Прогноз снижения стоимости 2G ВТСП проводов (по данным компании AMSC для условного провода «344» с током 200А) и начала их интенсивного коммерческого использования.

И далее...

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Медь как материал текстурированной ленты-подложки 3

ВТСП УСТРОЙСТВА

Испытан ВТСП токоограничитель Nexans на 11 кВ 5

ЗАРУБЕЖНЫЕ ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

Компания Southwire 7

В настоящее время в мире наиболее перспективными и продвинутыми считаются технологии производства ВТСП провод второго поколения (2G), заключающиеся в последовательном нанесении на металлические подложки (ленты) нескольких оксидных буферных слоев, чтобы обеспечить необходимую текстурированную основу для эпитаксиального роста ВТСП слоя (как правило, на основе YBCO). Далее обычно наносится тонкий защитный серебряный слой. Иногда наносятся дополнительно более толстые металлические стабилизирующие слои с обеих сторон провода, чтобы достигнуть требуемых электрических, тепловых и механических свойств.

Различные компании (в США – American Superconductor, SuperPower; в Японии – Fujikura, ISTEK, Sumitomo; в Германии – Bruker, Theva; в Корее – KERI) на конкурентной основе развивают собственные патентно защищенные методы получения ВТСП проводов второго поколения. Они надеются в ближайшем будущем получить преимущества на рынке за счет снижения удельной себестоимости и увеличения выхода качественной продукции.

Вклад в себестоимость производства может быть разделен на несколько составляющих: стоимость сырья и материалов, стоимость рабочей силы, капитальные затраты на оборудование, на сооружение зданий, текущие расходы на электроэнергию и воду.

Затраты на сырье определяются установившейся рыночной ценой единицы измерения материала, а также расходом этого материала на один метр готового провода. Сечение 2G провода определяется в основном подложкой и стабилизирующим слоем. Буферные слои очень тонкие и поэтому фактические затраты на материал буферных слоев не вносят существенного вклада в себестоимость провода. Сверхпроводящий слой может включать очень дорогие компоненты, поэтому его вклад в себестоимость существенен. Объемная доля применяемого защитного серебряного слоя мала, но это все же достаточно дорогой металл, отказаться от которого в технологии полностью невозможно.

Трудовые затраты могут быть минимизированы за счет автоматизации оборудования, и роста объема единичной партии продукции. В настоящее время хорошим показателем является производственный цикл, работающий с кусками ВТСП лент длиной до одного километра.

Оптимизация капиталовложений в оборудование по отношению к скорости выхода продукции крайне важна для уменьшения затрат на амортизацию в конечной цене провода. Скорость выхода в данном случае – это произведение линейной скорости движения ленты в процессах на число параллельных проводов, которые могут быть обработаны оборудованием. Скорость движения ленты зависит от геометрического размера зоны обработки и растет с увеличением величины этой зоны.

С ростом объемов производства соотношение между категориями затрат (структура цены) меняется. На рис. 2 показана структура цены, рассчитанная Sandia National Laboratories для 2G провода, полученного методом TFA-MOD, в зависимости от производительности процесса. В расчетах предполагалась величина удельного критического тока в 200 А на сантиметр ширины ленты, цена подложки в \$2/м, при годовом производстве 1200 км/год. Видно, что, начиная с некоторой скорости, фактическая себестоимость ВТСП ленты определяется лишь расходами на материалы и рабочую силу. Поэтому перспективы снижения себестоимости при достаточно высоком уровне развития любой технологии в первую очередь зависят от цены применяемого сырья и материалов, причем наиболее важными здесь являются расходы на подложку, сверхпроводящий слой и стабилизирующее покрытие (составляющего в некоторых случаях до 40% от толщины провода), при небольшом вкладе стоимости серебра.

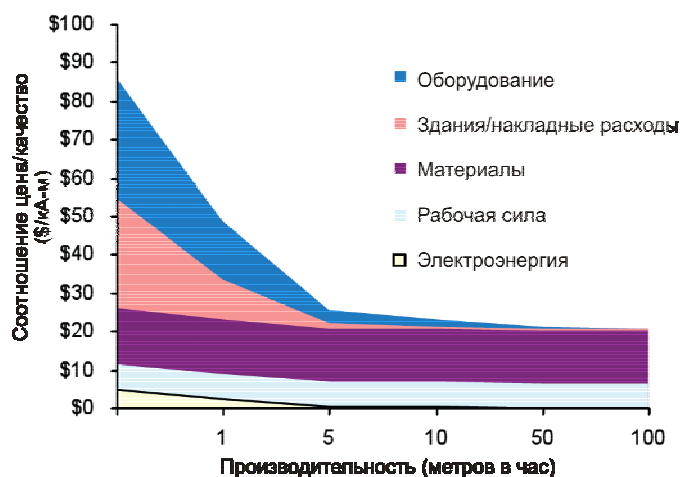


Рис. 2. Структура цены ВТСП провода в зависимости от производительности установки.

Наиболее существенные отличия в конкурирующих технологиях заключаются именно в материале подложки, а также способе нанесения сверхпроводящего покрытия. Текущие рекордные достижения (на осень 2008 г.) различных технологий представлены в таблице 1.

Следует отметить, что представленные рекордные достижения не оптимизированы по себестоимости и скорее представляют демонстрацию возможностей конкретного метода.

Более показательной является таблица 2, в которой компания Bruker попыталась оценить предел стоимости на материалы. Наиболее дешевым по подложкам является метод импульсного лазерного распыления (PLD), т.к. при этом можно использовать подложки из нержавеющей стали. Что касается ВТСП слоев, то здесь «чемпионом» по дороговизне является метод IBAD/MOCVD, поскольку здесь используется крайне дорогие металлоорганические соединения, стоимость которых в малых партиях достигает \$15-25 тыс. за кг. В результате себестоимость ВТСП

покрытия достигает \$50-70 тыс. за кг, а в расчете на 1 км ленты – до \$400-1500. Более выигрышно смотрится сырье для метода лазерного напыления – обычные оксиды металлов, что дает цену ВТСП покрытия по материалу около \$600. за кг, а в расчете на 1 км ленты – около \$50. Метод RABiTS/MOD зани-

мает промежуточное место, так как трифтороацетатные соли (TFA), используемые для производства MOD прекурсора сверхпроводящего покрытия, являются в целом менее сложными и более дешевыми, чем химикаты, используемые в конкурирующих MOCVD процессах.

Таблица 1. Рекордные достижения 2G ВТСП лент по различным технологиям производства (осень 2008 г).

Технология ВТСП слоя	MOCVD	MOD	PLD	PLD*
Подложка	Hastelloy	Ni-W (RABiTS)	нерж. сталь	Hastelloy
Макс. длина куска, L_{max} (м)	1311	130	510	10
Удельный критический ток, I_c , (А/см)	153	300	403	150
$L_{max} \times I_c$, (кА-м)	201	39	206	2
Производитель	Superpower ISTEC	AMSC	Fujikura Bruker ISTEC Sumitomo	Theva KERI

* Напыление из паровой фазы при помощи электронного пучка (electron beam physical vapor deposition)

Таблица 2. Минимальные затраты на материалы для ВТСП ленты (в €/км) по данным компании Bruker.

Технология ВТСП слоя	Хим. напыление 420	Лазерное напыление 50	Напыление из паровой фазы электронным пучком 100
Подложка	Ni-W (RABiTS) >500	Нерж. сталь 60	Hastelloy >700
Шунтирующий слой	E-Plating 70	Lamination 70	PLD 150
Всего		180 €/км	

Здесь необходимо отметить, что метод лазерного распыления требует существенных расходов на текущее обновление элементов эксимерного лазера – газа и камер, так как они имеют ограниченный ресурс по числу импульсов. Следовательно, эти элементы фактически являются расходным материалом с затратами выше, чем затраты на материал подложки и ВТСП слоев. Так как лазерная техника совершенствуется, есть надежда на снижение этих расходов.

В целом, минимальная себестоимость ленты по IBAD/MOCVD процессу может составить до \$25-30/кА-м, по RABiTS/MOD процессу – \$20-25/кА-м и по IBAD/PLD процессу – \$12- 20/кА-м.

С.В. Шавкин

1. <http://www.tcsuh.uh.edu/cca08/>

Медь как материал текстурированной ленты-подложки

Авторы из Японии недавно опубликовали интересный результат: ими получены образцы высококачественных ВТСП покрытий на текстурированных медных лентах [1]. Медные ленты давно уже рассматриваются как привлекательная альтернатива лентам из никелевых сплавов. Медь дешевле; не проявляет ферромагнитных свойств; образующаяся в медных лентах кубическая текстура острее, чем у никеля и его сплавов. К недостаткам меди можно

отнести крайне плохие механические свойства и возможность реконструкции поверхности и закругления границ зёрен (grain grooving) при температурах, необходимых для осаждения буферных и ВТСП слоёв. Окисляется медь при более высоких давлениях кислорода, чем никель, но окисление идёт быстрее, так как слой оксида плохо задерживает кислород. С медными лентами в разное время работало несколько групп, опробовано несколько систем буферных слоев (см. таблицу 1). Получить хорошие слои на меди получалось пока только с использованием в качестве первого буферного слоя либо никеля, либо нитрида титана.

Таблица 1. Опробованные буферные слои на текстурированных подложках из меди и свойства ВТСП слоёв на них.

Буферный слой	J_c (sf, 77K), MA/cm ²	J_c (1 Тл, 77K), MA/cm ²	Ссылка
CeO ₂ /YSZ/CeO ₂ /Ni	1,9	0,2	[1]
LaMnO ₃ /MgO/TiN	1	0,03	[2]
(La,Sr)MnO ₃ /Ni	2,3	0,4	[3]
LaMnO ₃ /Ni	1		[4]

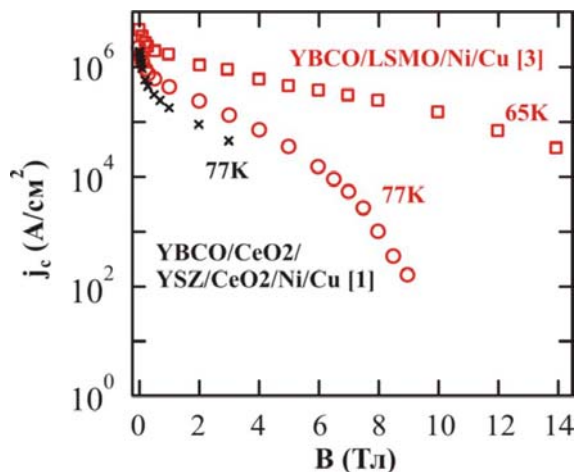


Рис. 1. Сверхпроводящие характеристики лучших на сегодняшний день образцов ВТСП на подложках из текстурированной меди.

В работе японских авторов в качестве первого буферного слоя используется никель, осаждаемый электролитически. Этот процесс в целом проще вакуумных методов осаждения (применявшихся в [3-5]) и существенно дешевле. Осаждаясь электролитически из раствора, никель растёт эпитаксиально на поверхности меди, что использовалось и ранее [6-8]. Японскими авторами было сделано интересное наблюдение – при нагреве до 750°C в свежесозданном слое никеля образовывались поры или вздутия, что, по-видимому, вызвано выходом газов, содержащихся в электроосажденном слое. Для предупреждения такого поведения оказалось достаточно часового отжига при чуть более низкой температуре, 700°C. Тонкий буферный слой никеля на поверхности меди является ферромагнитным, но отжиг при высокой температуре приводит к частичному растворению никеля в меди и практически полной потере подложкой ферромагнитных свойств.

Пожалуй, основное преимущество меди, как материала для биаксиально текстурированных лент, состоит в лёгкости получения в ней кубической текстуры. После прокатки необходимая острая текстура реализуется путём отжига при 200°C, причем ширина пиков на полувысоте может быть меньше 4°, что существенно лучше значений, свойственных никелевым лентам [7, 9]. Интересным является также возможность получения лент с зёрнами, вытянутыми в направлении прокатки [7]. Благодаря этому, на пути сверхпроводящего тока встречается меньше границ зёрен и критический ток оказывается выше.

На медь также возлагаются надежды в связи с созданием проводящего буферного слоя – тогда сама подложка может служить шунтирующим слоем в случае перехода ВТСП в нормальное состояние. Отпадает необходимость в слое меди поверх ВТСП – повышается инженерная плотность критического тока. Несмотря на некоторые удачные попытки [3],

этот подход, как следует из посвященного этой теме обзора [10], пока не получил распространения из-за технологических трудностей.

Для полноты картины надо вспомнить также работы по изучению сплавов на основе меди. Естественно, первоочередной задачей при выборе сплава является упрочнение меди. К сожалению, все добавки приводят к ухудшению текстурообразования, лишь в некоторых случаях (сплавы Cu-Ni, Cu-Mn) удаётся получить удовлетворительную текстуру с небольшим упрочнением сплава. Биметаллические ленты с использованием меди пока не исследовались. Опубликованные данные суммированы в таблице 2.

Таблица 2. Свойства сплавов на основе меди, для которых изучалось текстурообразование.

Состав	Предел прочности, (МПа)	Твердость по Викерсу (HV98mH)	Текстура	Ссылка
Cu	85	57	+++	[11, 12]
Cu-2.7%Fe	163		+	[11]
Cu-Al (1-4%)		55-60	-	[12]
Cu-Mn (1-4%)		59-65	-	[12]
Cu-35%Ni		120	+ / -	[12]
Cu-2%Mn			+ / -	[7]

В заключение отметим, что все описанные тут работы были посвящены лабораторным образцам, в технологическом плане все усилия сегодня сосредоточены на сплавах Ni-W. Но нельзя сомневаться, что интерес к меди как подложечному материалу будет появляться снова и снова – слишком хорошей является текстура, реализуемая в этом металле.

С.В. Самойленков

1. M. Tokudome et al., *J. Appl. Phys.*, **104**, 103913 (2008).
2. C. Cantoni et al., *J. Mater. Res.*, **18**, 2387 (2003).
3. T. Aytug et al., *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3963 (2003).
4. T. Aytug et al., *J. Mater. Res.*, **18**, 872 (2003).
5. N.A. Rutter et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **17**, 527 (2004).
6. Staller et al., "Electrodeposition of textured Ni on Cu (200) substrates", *International Workshop on Coated Conductors for Application (CCA'06)*, S_02.
7. R. Nast et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **43**, 357 (2006).
8. Y.X. Zhou et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **18**, 107 (2005).
9. Ph. Gerber et al., *Acta Materialia*, **51**, 6359 (2003).
10. K. Kim et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **19**, R23 (2006).
11. Ch.P. Varanasi et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **19**, 85 (2006).

ВТСП УСТРОЙСТВА

Испытан ВТСП токоограничитель Nexans на 11 кВ

Сверхпроводниковые ограничители токов (COT) короткого замыкания (особенно резистивного типа) являются одним из наиболее привлекательных применений высокотемпературной сверхпроводимости в электроэнергетике. Использование COT может предотвратить перегрузку коммутационной аппаратуры сети, которая возникает в результате коротких замыканий, а также избежать перебоев в энергообеспечении потребителей. В Nexans полагают, что подобные устройства могут играть ключевую роль в так называемых «умных сетях» будущего.

Одним из наиболее успешных проектов ВТСП токоограничителей, несомненно, является CURL 10, разработанный и изготовленный компанией Nexans совместно с исследовательским центром Forschungszentrum Karlsruhe (Германия). Успешные прошедшие в 2005-2006 гг. эксплуатационные испытания CURL 10 показали работоспособность ВТСП токоограничителей резистивного типа на базе массивных элементов из Bi-2212 керамики, после чего компания Nexans приступила к разработке сразу двух высоковольтных ВТСП токоограничителей: MFCL (совместно с компанией SuperPower, США) и CULT 110 (Германия). Следует отметить, что в ходе работ над токоограничителем MFCL его конструкция претерпела радикальные изменения, компания SuperPower отказалась от использования массивных ВТСП элементов из Bi-2212 в пользу ВТСП проводников 2-го поколения, и на сегодняшний день, в работах над сверхпроводящими элементами для токоограничителя MFCL компания Nexans участия не принимает. Проект CULT 110 финансируется германским правительством и в настоящий момент является самым крупным проектом ВТСП токоограничителя в Европе; он направлен на создание демонстрационного образца однофазного высоковольтного токоограничителя на 110 кВ, 1850 А, способного ограничить ударный ток до 31,5 кА, а установившийся ток короткого замыкания до 6 кА. Основные характеристики ВТСП токоограничителя CULT 110 приведены в таблице 1, для сравнения в ней указаны также параметры CURL 10.

Работы по проекту CULT 110 распределились между немецкими организациями следующим образом: все необходимые расчеты были выполнены в университете Лейбница (ГанOVER), Nexans Deutschland Industries разрабатывает криогенную часть проекта, Nexans Superconductors изготавливает отдельные компоненты и проводит финальную сборку устройства, а научный центр Forschungszentrum Karlsruhe (ИТР) отвечает за высоковольтные испытания.

Таблица 1. Основные характеристики CURL 10 и CULT 110.

	CURL 10	CULT 110
Число фаз	3	1
Номинальное напряжение, кВ	10	110
Номинальный ток, А	600	1850
Длительность короткого замыкания, мс	60	60
Общая длина сверхпроводника, м/фазу	150	234
Площадь сечения сверхпроводника, см ²	0,25	1,8

Слабой стороной токоограничителей резистивного типа является опасность появления «горячих точек», вызванная неоднородностью перехода сверхпроводника в нормальное состояние. В проекте CURL 10 в качестве защиты применялся шунт из медно-никелевого сплава, спаянный со сверхпроводником по всей длине, но такое решение не годится для высоковольтных устройств в силу чрезмерного расхода сверхпроводника. Допустимая величина нагрева шунта накладывает ограничение по падению напряжению на сверхпроводящем элементе в 80 В/м, чего явно недостаточно. Для токоограничивающих элементов CULT 110 была предложена новая схема шунтирования, при которой поверх сверхпроводящего элемента наматывается медная обмотка, соединенная параллельно с ВТСП элементом (рис. 1). Во время короткого замыкания ток перетекает в шунтирующую катушку, которая создает магнитное поле, приводящее к быстрому и достаточно однородному переходу сверхпроводника в нормальное состояние. Такое решение позволяет поднять максимально допустимое падение напряжения на ВТСП элементе с 80 В/м до 320 В/м, по сравнению с активным шунтированием сверхпроводника по всей его длине, расход же сверхпроводника сокращается в 4 раза.

Конструкция ВТСП элемента также претерпела ряд изменений по сравнению с CURL 10. Первоначально предлагался вариант, в котором плавный сверхпроводящий элемент из Bi-2212 керамики имел форму полого цилиндра, поверх которого наматывалась медная катушка, соединенная с ним последовательно. Однако для такой схемы уровень потерь на переменном токе был бы неприемлемо высок, и достигал бы 3 кВт для одной фазы токоограничителя CULT 110. Поэтому путем фрезеровки ВТСП элементу была придана форма спирали. Толщина ВТСП цилиндра была выбрана минимально возможной (2 мм) для снижения потерь на переменном токе и сохранения высокой критической плотности тока, ширина витка составляла 10,5 мм при диаметре цилиндра 50 мм.



Рис. 1. ВТСП элемент для токоограничителя CULT 110.

Для достижения рабочего напряжения в 110 кВ и тока в 1850 А требуется последовательно-параллельное

соединение большого числа ВТСП элементов (см. рис 2). Ток через отдельный ВТСП элемент в k раз меньше суммарного тока (где k – количество параллельно соединенных цепочек), следовательно, потери на переменном токе снижаются в k^2 раз (для CULT 110 $k \sim 10$). Общая длина сверхпроводника, необходимого для изготовления CULT 110, определенная из условия максимально допустимой температуры разогрева обмотки при коротком замыкании в 300 К, составила 231 м. При длине сверхпроводника в единичном ВТСП элементе в 260 мм для изготовления токоограничителя CULT 110 потребуется 650 таких элементов. ВТСП элементы были подвергнуты всесторонним испытаниям. Осциллограммы тока и напряжения на ВТСП элементе во время опыта короткого замыкания показаны на рис. 3.

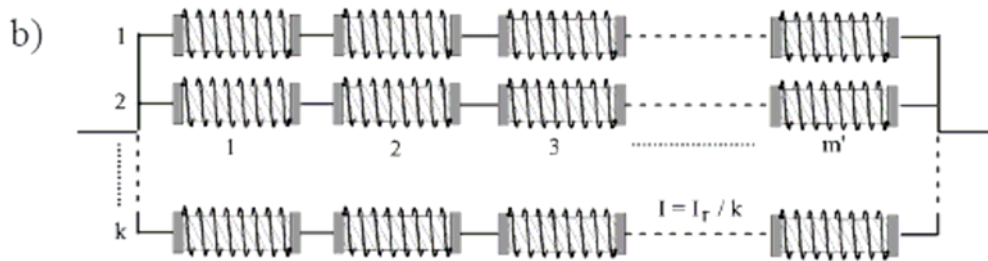


Рис. 2. Схема включения ВТСП элементов CULT 110.

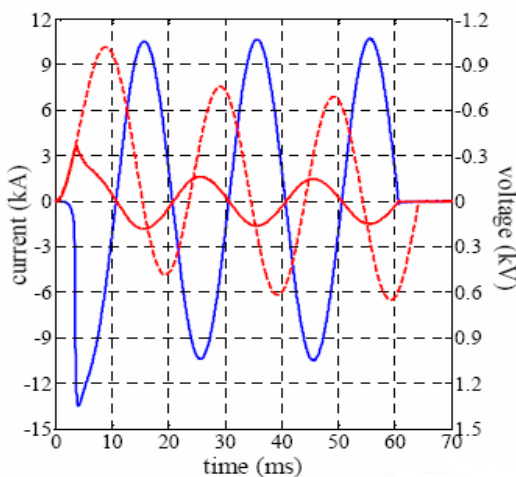


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на ВТСП элементе CULT 110.

Создание высоковольтного ВТСП токоограничителя большой мощности является сложной инженерной задачей, существует целый ряд вопросов, ответ на которые можно получить только в ходе полномасштабных эксплуатационных испытаний. Поэтому, прежде чем приступить к изготовлению токоограничителя CULT 110, компания Nexans разработала и изготовила еще один трехфазный ВТСП токоограничитель на 11 кВ, на котором будет проведена апробация конструктивных и технологических решений, разрабатываемых для использования в CULT 110. В отличие от CURL 10 в новом ВТСП токоогра-

ничителе используются ВТСП элементы, предназначенные для CULT 110, что позволило в несколько раз сократить расход ВТСП материалов и уровень потерь на переменном токе. Конструкция ВТСП токоограничителя, в целом, напоминает CURL-10 (рис. 4). Сокращение количества ВТСП элементов позволило сделать устройство более компактным.

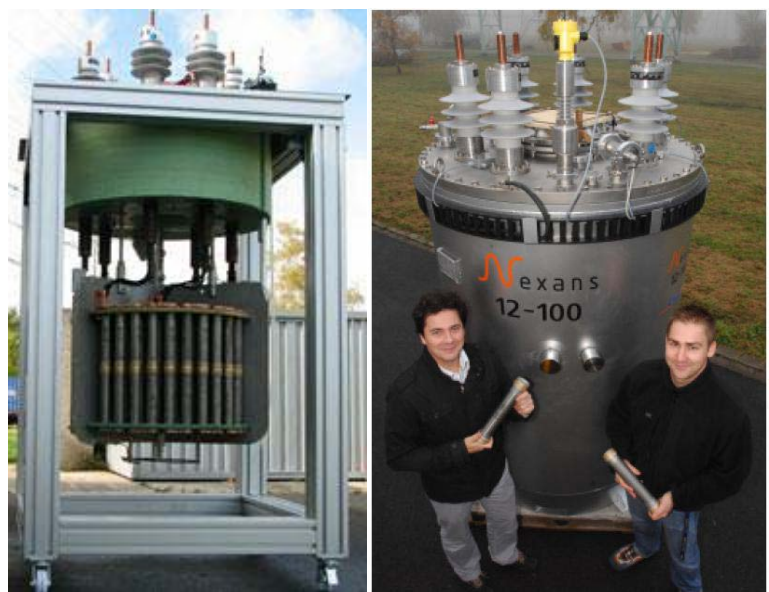


Рис. 4. ВТСП токоограничитель Nexans ASL.

В ходе стендовых испытаний ударный ток был ограничен с 10,2 кА до 3,7 кА, а установившийся ток

короткого замыкания удалось ограничить до 1,1 кА. ВТСП токоограничитель был подвергнут многократным коротким замыканиям, после 67 циклов коротких замыканий длительностью по 60 мс каждый, деградации критических свойств сверхпроводника обнаружено не было. После окончания стендовых испытаний токоограничитель был передан компании Applied Superconductor Ltd (Великобритания) для дальнейших эксплуатационных испытаний на распределительной подстанции на 11 кВ в Ланкашире, Великобритания.

Д.И. Шумова

1. S. Elschner et al., "Coil in Coil – Components for the High Voltage Superconducting Resistive Current Limiter CULT 110", *IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM*, no. 3, January 2008.
2. *Superconductor Week*, 23, no. 04, 1 (2009).
3. <http://www.conectus.org/newslinks.html>

ЗАРУБЕЖНЫЕ ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

Компания Southwire

Компания Southwire в течение более чем 55 лет является ведущим производителем проволоки и кабельной продукции в Северной Америке. Используя технологию непрерывного литья, Southwire изготавливает провода и кабели для воздушных и подземных линий электропередачи, медные и алюминиевые шины. Штаб-квартира компании находится в Карролтоне (шт. Джорджия, США).

Southwire Company является одним из лидеров в разработке и реализации новых технологий в своей отрасли. В последние годы компания активно включилась в освоение технологий для производства кабелей на основе ВТСП материалов и достигла в этом значительных успехов.

Об основателе «Southwire»



Основатель компании Рой Ричардс родился в сельском местечке на западе штата Джорджия 11 апреля 1912 года.

Своей жизнью Рой Ричардс доказал, что один человек может совершить многое. Его отличали качества, характерные для всех первопроходцев: дух первенства, стремление бросать вызов судьбе, способность

«трудиться, не покладая рук». Опираясь на собственные силы и стремление к успеху, он осуществил электрификацию сельского юга США, для чего ему пришлось преобразовать всю электрическую индустрию страны.

Предки Ричардса вели простой образ жизни, но были известны как люди, интересующиеся облегчающими труд техническими усовершенствованиями. Уже в возрасте 10-ти лет Рой начал работать на лесопилке своего отца истопником. К 14 годам он освоил все операции, как на лесопилке, так и по заготовке и транспортировке леса. Со временем он стал профессионалом в различных направлениях трудовой деятельности, в том числе в менеджменте и бизнесе. Без отрыва от производства он продолжал среднее образование, а в 1931 году, поступил в Технологический Институт штата Джорджия. Получив в 1935 году учёную степень бакалавра инженера-механика, он вернулся назад на родную лесопилку и, спустя два года, организовал Roy Richards Construction Company. Занимаясь изготовлением опор и проводов для линий электропередач по контракту в 118 тысяч долларов с Rural Electrification Administration, ему удалось создать новую технологию сборки линий, которая используется и до сих пор.

Во время Второй Мировой Войны Рой занимал должность Профессора Военных наук в армии США и дослужился до звания капитана.

Послевоенный спад производства сдерживал развитие его компании. Только в марте 1950 года компания воспрянула и переселилась в здание площадью более тысячи кв.м, штатом в 12 человек и старым оборудованием. К концу следующего года компания удвоила размер промышленных площадей, увеличив штат рабочих до 22, и довела размер продаж до \$560000.

К 1953 году Рой Ричардс модернизировал процесс производства, перейдя на новую технологию – метод непрерывной разливки, приобретя патент и оборудование у итальянских промышленников. Его фирма первой начала производить таким способом алюминиевый провод, а сегодня основная часть заготовок для проводов и кабелей из алюминия изготавливаются этим методом. С 1963 года непрерывная разливка стала использоваться и для производства медного провода и сегодня половина медных заготовок получают по запатентованному Southwire методу.

Став национальным лидером в производстве проводов и кабелей, компания получила разрешение президента Дж.Ф. Кеннеди на экспорт продукции в 17 стран мира. Доход компании от продаж составил в 1968 году 142 миллиона долларов. В это же время компания разработала и запатентовала алюминиевые сплавы для изготовления кабелей, предназначенных для прокладки внутри зданий.

После смерти Роя в 1985 году главой компании семьёй Ричардсов был назначен С. Торн. Сегодня, Southwire по-прежнему известна как новатор и является собственником более 400 патентов.

Совместное предприятие Southwire-nkt cables

Первым шагом Southwire в разработках ВТСП кабелей явился 30 метровый кабель (12,47 кВ, 1,25 кА), функционировавший с 2000 г. в течение 7 лет в промышленной зоне г. Карролтон (шт. Джорджия). Следует отметить, что в самом начале своих разработок ВТСП силовых кабелей Southwire активно привлекала для консультаций В.Е. Сытникова из ВНИИКП, который сейчас возглавляет первые разработки отечественных ВТСП силовых кабелей.* В 2002 году компания объединила усилия с датской компанией nkt cables для разработки и изготовления коммерческих сверхпроводящих кабельных систем в рамках проекта Ultera.

Конструкция кабеля Ultera – триаксиальная с концентрически расположенными тремя фазами. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с кабелями, в которых каждая фаза расположена в отдельном криостате: вдвое меньший расход ВТСП материала, снижение затрат на криогенное обеспечение и сокращение площадей как подстанции, так и земель отчуждения под прокладку кабеля. Первым детищем Ultera явился 30 метровый кабель на 30 кВ/2,4 кА, проработавший в действующей сети Копенгагена (Дания) в 2001-2003 гг. В 2009 году отметили 2,5 года успешной работы другого проекта – 200 метрового кабеля (13,2 кВ, 3,0 кА) на подстанции Биксби (г. Коламбус, шт. Огайо). Кабели для всех

вышеперечисленных проектов были изготовлены из ВТСП материалов 1-го поколения.

В настоящее время совместное предприятие Southwire-nkt cables является участником проекта по прокладке 6 км сверхпроводящего кабеля в городской черте Амстердама (Нидерланды). Рабочее напряжение ВТСП кабеля составит 50 кВ, номинальный ток 2900 А, а передаваемая мощность достигнет 250 МВА. Сейчас на предполагаемом месте прокладки ВТСП кабеля располагаются три газонаполненных высоковольтных кабеля с рабочим напряжением 150 кВ, соединяющих между собой две распределительные подстанции. ВТСП кабель будет установлен в существующем кабельном канале и займет место одного из обычных кабелей. Триаксиальный тип кабельной системы заложен также в проект кабеля для Манхеттена протяженностью 300 м (1,38 кВ, 4 кА) и в проект для Нового Орлеана длиной в 1,7 км (13,8 кВ, 2 кА). В двух последних проектах намечено изготавливать кабель из ВТСП 2-го поколения.

С.А. Лелехов

1. www.southwire.com
2. <http://www.supercables.com/>
3. www.nktcables.com

* *Примечание редактора*

Издатель РИЦ «Курчатовский институт»

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

Научный редактор: *В.С. Круглов*, зам. директора ИСФТТ РИЦ «Курчатовский институт»

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

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

В подготовке выпуска принимали участие: *С.А. Лелехов*, *С.В. Самойленков*,

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

Верстка: *И.Л. Фурлетова*