Информационный бюллетень
СВЕРХПРОВОДНИКИ для электроэнергетики
Исследовательские центры Фирмы Инвесторы
Провода Кабели Генераторы Накопители
Трансформаторы Токоограничители

Том 12 выпуск 6 (57)

декабрь 2015

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

Поздравление с Новым Годом

Оптимисты, вперед!

С Новым Годом, уважаемые, дорогие, трудолюбивые коллеги! Научные журналы Science и Nature, подводя итоги в конце года, пишут о наиболее выдающихся результатах исследований, а также о самых влиятельных ученых. Не страдая излишней скромностью, редакция нашего издания «Сверхпроводники для электроэнергетики» позволила себе подумать: «чем мы хуже?». Уходит 2015 год. Не нам судить о подлунном мире, но близким, видимым и осязаемым можно поделиться.

В этом году в Италию отправлено три последних отрезка (из 28 успешно испытанных в Курчатовском комплексе НБИКС технологий) токонесущего элемента для обмоток тороидального поля сверхпроводящей магнитной системы международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР. Ход испытаний наглядно проиллюстрирован фотографией вакуумной камеры объёмом 120 м^3. В ней осуществлялся контроль герметичности токонесущих элементов и определялись гидравлические характеристики их проточных частей, все работы проводились в соответствии с международными стандартами. Длина токонесущего элемента в зависимости от его типа составляет 415 или 760 м.

В ходе выполнения президентской программы «Сверхпроводниковая индустрия» разработан и изготовлен модельный ряд сверхпроводящих токовводов, в том числе, для устройств ускорительной техники. Изготовлены токовводы на основе ВТСП первого поколения для магнитных систем бустера дубненского коллайдера «НИКА». Найдено новое конструктивное решение для токовводов на основе ВТСП второго поколения. Большая часть испытаний токовводов проводилась в НИЦ «Курчатовский институт» на изготовленном стараниями наших сотрудников испытательном стенде.

В этом году, успешно завершилась многолетняя «эпопея» по запуску в НИЦ «Курчатовский институт» первой в России пилотной линии по выпуску ВТСП лент 2-го поколения, реализующей все технологические процесса на единой площадке.

И далее…

Новости сайта «Сверхпроводники в электроэнергетике» http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/ **2**

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

EUCAS-2015: Устройства на основе сверхпроводников **5**

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Разработка и создание токонесущих элементов типа Ребель в Технологическом Институте Карлсруе по состоянию на 2015 г. **8**

НТСП УСТРОЙСТВА

Новый детектор для обновленного БАК-FCC **13**

Выступая в тесном сотрудничестве, упорно преодолевая все технические, финансовые, административные и даже внешнеполитические трудности, НИЦ «Курчатовский институт», АО «Русский сверхпроводник» и немецкая компания Bruker HTS решили поставленную задачу! Теперь отечественные ученые и инженеры, работающие в области прикладной сверхпроводимости, смогут в полном объеме использовать перспективную связку передовой технологической производственной площадки и уникальных исследовательских возможностей НИЦ «Курчатовский институт». Это позволит перейти к следующему этапу: выпуску километровых отрезков ВТСП лент 2-го поколения с повышенными потребительскими свойствами и организации промышленного производства отечественных ВТСП материалов, чего так ждут все разработчики сверхпроводниковых устройств.

В НИЦ «Курчатовский институт» организована и проведена Третья Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости. Сверхпроводниковая братия более чем из 30 организаций откликнулась сотней докладов. Отрадно, что с каждым годом увеличивается число молодых людей, как среди слушателей, так и среди докладчиков.

В этом году в Отделении сверхпроводимости появилось два кандидата технических наук.

Михаил Станиславович Новиков - «Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения». В результате напряженной работы изготовлены прототипы гибкого сильноточного токонесущего элемента малого диаметра из ВТСП-2 лент, геликоидально намотанных в несколько слоев на гибкий формер. Создана установка для изготовления сильноточных токонесущих элементов и устройств на их основе, в том числе для магнитных систем токамаков; плазменных двигателей и магнитных экранов космического назначения; импульсных магнитов и магнитных систем ускорителей (высокополевые вставки, гибкие токоподводы); электрических машин; токоограничителей.

Дмитрий Николаевич Диев - «Исследование низкотемпературных физико-механических свойств ВТСП-лент 2-го поколения и оболочек кабелей на основе Nb_3Sn». Разработана уникальная установка для криогенных механических испытаний оболочек сверхпроводящих кабелей, которая была использована в рамках проекта ИТЭР. Проектирование магнитов на основе ВТСП лент 2-го поколения невозможно без учета механических свойств ВТСП лент. Были созданы методики и устройства, позволившие исследовать процессы деградации критических свойств ВТСП лент при поперечных и продольных механических нагрузках. Полученные результаты помогут при конструировании высокополевых магнитов, магнитов для ускорительной техники и индуктивных накопителей энергии.

Чем будет примечателен год следующий?
Нам ли стоять на месте?
Сможем, сумеем, воплотим, преодолеем!
И будут на нас звезды удивленно смотреть!

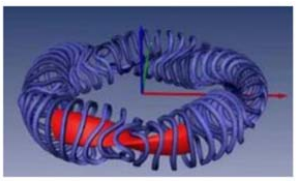
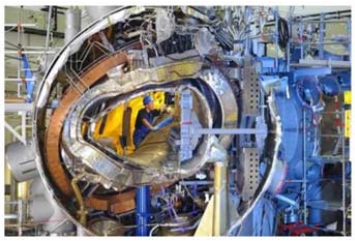
Новости сайта «Сверхпроводники в электроэнергетике»

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

Этапы большого пути сталларатора Wendelstein 7-x

СтеллараторWendelstein 7-x готов к включению

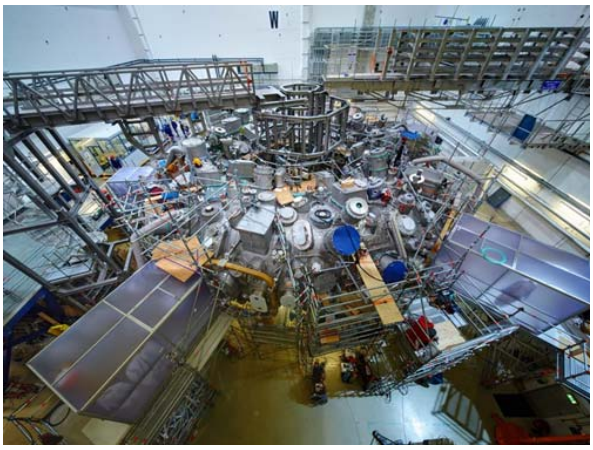
На северо-востоке Германии в Грифсвальде в ноябре этого года проводилась первая попытка включения стелларатора Wendelstein 7-x - реактора термоядерного синтеза, достаточно необычной, отличающейся от токамака, конструкции. Магнитная система реактора состоит из 50 сверхпроводниковых секций высотой 3,5 м и общим весом более 400 тонн. Стелларатор Wendelstein 7-x создает неоднородное магнитное поле, напоминающее перекрученную несколько раз ленту Мебиуса (см. рис.). В результате, магнитная система способна удерживать плазму непрерывно в течение 30 минут. Этот уникальный термоядерный реактор был создан в Институте физики плазмы Макса Планка. Понадобилось 15 лет и более миллиарда евро, а количество трудовых затрат превысило 1 миллион человеко-часов. В случае успешного запуска реактор должен послужить испытательным стендом, позволяющим выяснить все особенности поддержания реакции термоядерного синтеза в непрерывном цикле, что требуется для производства электроэнергии.

Слева - плазменный шнур и магнитная система. Справа (фото 2011 г.) - вакуумная камера, одна из сверхпроводниковых катушек, часть опорной конструкции и криостат вместе с шинопроводами и трубопроводами для подачи гелия

Информационный сайт gizmag

СтеллараторWendelstein 7-x: срок запуска - 10 декабря

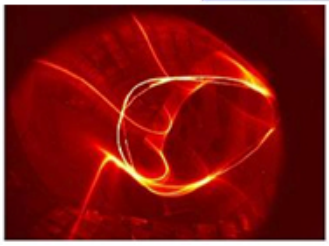


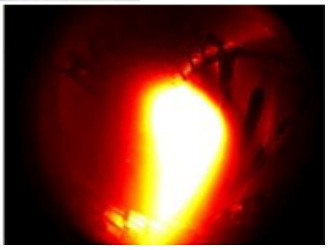
Запуск установки был запланирован на 10 декабря. На первом этапе планировалось получить гелиевую плазму. Подобную плазму легче получить, чем водородную, к тому же инертный газ дополнительно очистит поверхность плазменной камеры. Водородную плазму планируется получить в январе следующего года. В настоящее время Wendelstein 7-x является крупнейшей термоядерной установкой в мире, рассчитанной на стационарный (до 30 минут) режим работы, а не на квазиимпульсный, как для установок типа Токамак. Плазменный шнур в стеллараторе будет занимать объем 30 куб. м. Установку планируется использовать для проверки технических решений будущих термоядерных реакторов энергетического назначения. На фото общий вид стеллараторaWendelstein 7-x.

Сайт Макс Планк Института Физики Плазмы

Пуск стеллераторaWendelstein 7-X

Как было запланировано, 10 декабря в стеллераторе Wendelstein 7-X впервые получена гелиевая плазма.





Наверху одна из секций камеры удержания плазмы. Слева - кадр, полученный в процессе включения магнитного поля. Справа - первая гелиевая плазма в Wendelstein 7-X.

Сайт Макс Планк Института Физики Плазмы

Россия: молодым везде у нас дорога

С радостью поздравляем молодых ученых ОАО «ВНИИКП» Сергея Фетисова, Кирилла Шутова и Дениса Каверина с признанием их заслуг в «Разработке, изготовлении, испытании и исследовании свойств сверхпроводящих кабелей для высокоэффективных энергетических установок и новых энергоэффективных линий электропередач». В Доме Правительства Московской области Губернатором А.Ю. Воробьевым 10 ноября 2015 г. в ходе торжественного мероприятия, посвященного Всемирному дню науки, им вручена премия за инновационную научную деятельность. Желаем молодым специалистам дальнейших успехов в решении многочисленных задач в области сверхпроводниковых технологий электроэнергетики.

сайт ОАО «ВНИИКП»

Bruker: новые ЯМР спектрометры сверхвысокого разрешения

Университет Рио де Жанейро (Бразилия), Политехническая школа в Лозанне (Швейцария) и Университет Лидса (Англия) заказали в компании Брукер (Германия) ЯМР спектрометры сверхвысокого разрешения с резонансной частотой 900 и 950 МГц (магнитное поле 21 и 22 Тл). ЯМР спектрометр для Лозанны будет иметь теплое отверстие большого диаметра (89 мм), а ЯМР спектрометр для Университета Лидса будет оборудован криогенным высокочастотным модулем CryoProbe для спектрометрии по водороду, углероду и азоту. В этом году компания получила к уже имеющемуся портфелю из семи заказов еще два заказа на спектрометры сверхвысокого разрешения. Научные центры Германии и Франции рассчитывают получить ЯМР спектрометры следующего поколения с частотой 1 ГГц и 1,2 ГГц (23 и 28 Тл). Возможность создания ЯМР спектрометра на 1.2 ГГц пока еще не вполне очевидна и зависит от успехов в создании ВТСП материалов и изготовления магнитов на их основе.

Сайт корпорации Bruker

CERN: Рекордный сверхпроводниковый дипольный магнит

Более чем десятилетний труд научного сообщества под эгидой ЦЕРНа увенчался успехом: в сентябре испытан опытный сверхпроводниковый диполь (RMC, RacetrackModelCoil) двухметровой длины, с рекордной магнитной индукцией в 16,2 Тл, рабочим током 18,5 кА при температуре 1,9 К. В опытном образце канал для пучка пока не предусмотрен. Обмотки диполя выполнены из ниобий оловянных сверхпроводников, тогда как в диполях Большого

адронного коллайдера (БАК) использовались ниобий титановые проводники, а рабочее поле было почти в два раза ниже - 8,3 Тл, (при токе - 13 кА и *T* = 1,9 К). При создании рекордного диполя RMC были использованы новые способы механического упрочнения магнита (bladder-and-keys). Уже создано два модельных диполя на основе ниобий-оловянных проводников, изготовленных по различным технологиям: «порошок в трубе» (PIT) и RRP-RestackRodProcess. На обмотках из PIT проводника достигнуто поле в 16 Тл, на обмотках из RRP проводника – 16,2 Тл. Пока созданы только первые прототипы, в дальнейшем магнитное поле макетных образцов должно быть повышено до 18 Тл, а длина магнита до 5-7 метров. В рамках работ по модернизации БАК разрабатывается и к лету 2016 года будет изготовлен ниобий-оловянный диполь с полем 13 Тл, и каналом для пучка диаметром 100 мм.

сайт ЦЕРНа

Успешная защита М.С. Новикова

16 декабря на заседании диссертационного совета Института теоретической и прикладной электродинамики РАН при участии Объединенного института высоких температур РАН состоялась защита работы «Разработка, изготовление и исследования сильноточных токонесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения» начальником лаборатории Отделения Сверхпроводимости НИЦ «Курчатовского института» Михаилом Станиславовичем Новиковым на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Поздравляем нашего друга и коллегу с завершением существенного этапа нелегкой работы и успешной, блестящей защитой первой научной степени. Пожелаем Михаилу Станиславовичу на достигнутом не останавливаться.

70 лет в первых рядах

Высокотехнологический научно исследовательский институт неорганических материалов (ВНИИНМ) имени академика Андрея Анатольевича Бочвара отмечает семидесятилетие своей деятельности в многочисленных областях науки, техники, промышленности. Институт принимал участие в важнейших передовых государственных отраслевых проектах 1945-2015 гг. Можно назвать некоторые из них: проекты по созданию первых ядерных бомб, первых ядерных реакторов, первых атомных лодок и ледоколов, первой АЭС.

ВНИИНМ является головным технологическим предприятием в области технической сверхпроводимости. В Институте Бочвара созданы сверхпроводящие материалы для первых в мире Токамаков. На французскую площадку ИТЭР в этом году отправлены несколько километров кабелей из разработанных во ВНИИНМ ниобий-оловянных и ниобий-титановых сверхпроводников, признанных лучшими среди других поставщиков.

Воплощение любой научной мысли в высокотехнологичное изделие невозможно без материалов, из которых это изделие будет изготовлено. ВНИИНМ создает материалы с требуемым набором свойств. И это не все. Институт разрабатывает технологию крупномасштабного производства этих уникальных материалов. В настоящее время в Институте разрабатываются перспективные ниобий-оловянные сверхпроводники с повышенной токонесущей способностью для международных МЕГА проектов: дубненского коллайдера НИКА, Европейского центра FAIR (Facility for Antiprotonsand Ion Research) и для коммерческого применения в производстве медицинских магнито-резонансных томографов. В направлении производства высокотемпературных сверхпроводников ведутся работы по созданию металлической ленты-подложки и керамических мишеней для лазерного напыления буферных и сверхпроводящих слоев многослойных высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения

У ВНИИНМ блестящее прошлое и многообещающее настоящее. Пожелаем Институту великих свершений в будущем

Успешная защита Д.Н. Диева

24 декабря на заседании диссертационного совета Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук состоялась защита работы «Исследование низкотемпературных физико-механических свойств ВТСП-лент 2-го поколения и оболочек кабелей на основеNb_3Sn» начальником лаборатории Отделения Сверхпроводимости НИЦ «Курчатовского института» Диевым Дмитрием Николаевичем на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Мы рады поздравить Дмитрия Николаевича с заслуженным научным статусом. Желаем на первой ступеньке научных достижений немного передохнуть и двинуться дальше вперед и выше.

А.К. Чернышева

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

EUCAS-2015: Устройства на основе сверхпроводников

Первая часть обзора по результатам 12-й Европейской конференции по прикладной сверхпроводимости (EUCAS-2015) была посвящена обзору современного состояния разработок в области получения высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения (ВТСП-2). Данная часть будет посвящена обзору современного состояния в области создания различных устройств на основе сверхпроводников, в частности ВТСП-2.

Одним из наиболее ярких докладов по разработке и созданию ВТСП токонесущих элементов был доклад, представленный Вилрфридом Голдэкером. Технологический институт Карлсруэ прошел длинный путь по созданию ВТСП токонесущих элементов различных конструкций, таких как Roebel, ConductorOnRoundCoreCables (CORC), а также резерфордовский кабель, скрученный из нескольких кабелей типа Roebel. Конструкции и характеристики различных ВТСП токонесущих элементов представлены на Рис. 1.

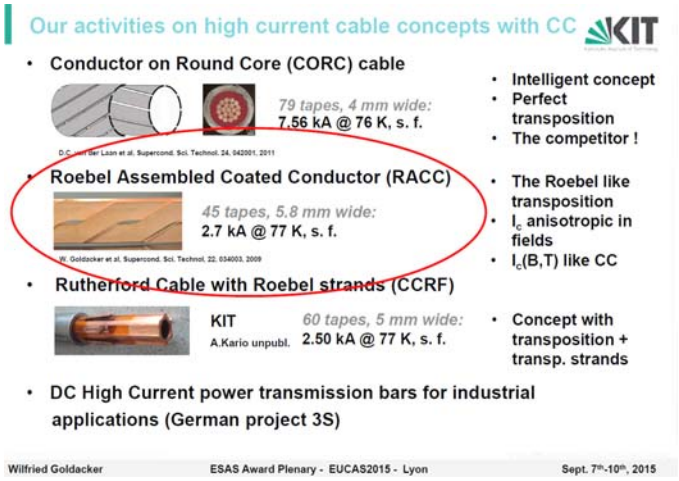


Рис. 1. ВТСП токонесущие элементы различных конструкций, разработанные сотрудниками технологического института Карлсруэ.

В докладе кратко описана история создания токонесущих элементов типа Ребель, даны характеристики токонесущих элементов на основе ВТСП-2 лент производства компаний SuperOx и SuperPower. (Рис. 2). На Рис. 3 приведены примеры практического использования токонесущих элементов в ветроэнергетике и магнитных системах для модернизации большого адронного коллайдера. Более подробно разработка и создание ВТСП токонесущих элементов изложены в наших ранних обзорах.

На пленарном заседании профессор Пингсиан Зан доложил о развитии применения ВТСП в Китае . На сегодняшний день, Китай стремится занять лидирующие позиции в области сверхпроводимости. Основные проекты по созданию ВТСП электротехнического оборудования за 2011-2015 гг. представлены на Рис. 4, среди них несколько проектов ограничителей тока короткого замыкания и кабелей с высокой токонесущей способностью.

Подробные характеристики проложенного на заводе в ЖонгФу ВТСП кабеля постоянного тока на 10 кА длиной 360 м представлены на Рис. 5. В процессе создания кабеля особое внимание было уделено разработке и созданию системы криообеспечения.

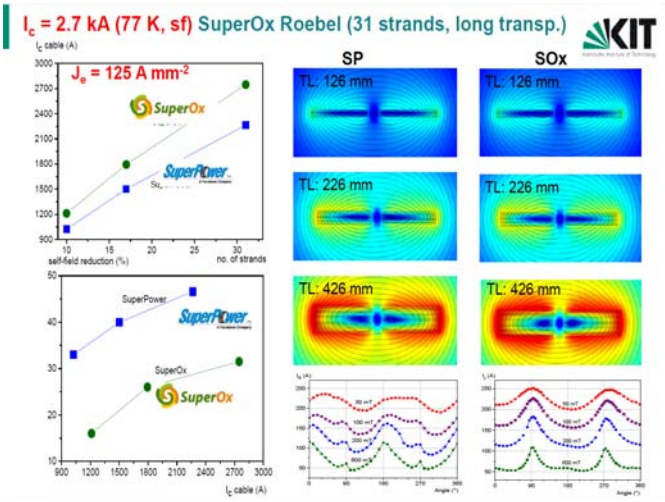


Рис. 2 – Характеристики токонесущих элементов типа Ребель на основе ВТСП-2 лент производства компаний SuperPower и SuperOx.

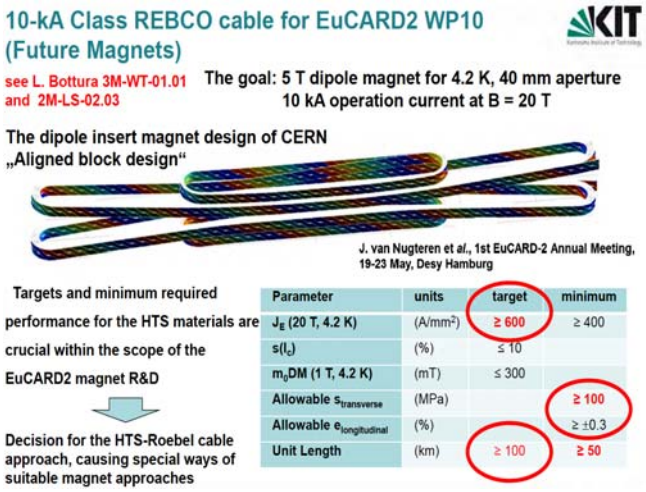


Рис. 3. Токонесущий элемент типа Ребель на основе ВТСП-2 лент разработанный для проекта EuCARD2 - перспективный диполь для модернизации БАК.

В настоящее время в Китае создана силовая подстанция, включающая в себя ВТСП кабель переменного тока длиной 75 м, ВТСП ограничитель тока короткого замыкания, ВТСП трансформатор и сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии на 10,5 кВ и 1,5 кА. Фото оборудования со схемой сверхпроводящей силовой подстанции представлено на Рис. 6.

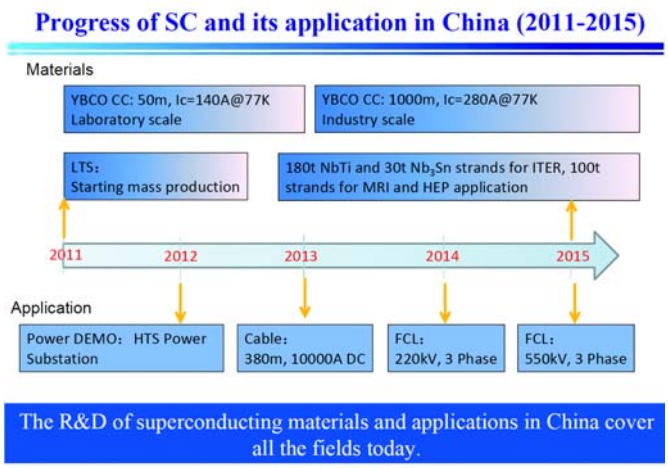


Рис. 4 Программа по созданию ВТСП электротехнического оборудования в Китае.

10kA HTS Cable: the design parameters

No.	Items	Parameters
1	Total length of the DC HTS power cable	362.4m
2	Total length of the cryogenic envelope / LN_2 flow pipe	350.1m / 367.4m
3	Length / out diameter of the termination	6.15m / 325mm
4	Out diameter of the DC HTS power cable	151mm
5	Layers of the cable core	5
6	Winding angle of the cable core	15º (with difference for each layer)
7	Total length of the HTS tapes used	46km
8	Heat loss of the cryogenic envelope / LN_2 flow pipe	2W/m / 1.0W/m
9	Segmentations of the cryogenic envelope / LN_2 flow pipe	Totally 8 segments
10	Dielectric type	Warm dielectric
11	Total hest loss of the DC HTS power cable system	2487W
12	Refrigeration type / capacity	LN_2 circulation / 4kW@77K
13	Designed critical current	12,500A
14	Rated current	10,000A
15	Rated voltage	1300V
16	Minimum bending radius	3.0m

The 360m/10kA cable was installed in ZhongFu electrolytic aluminium factory in 2013

Рис. 5 Параметры ВТСП кабеля созданного в Китае

.

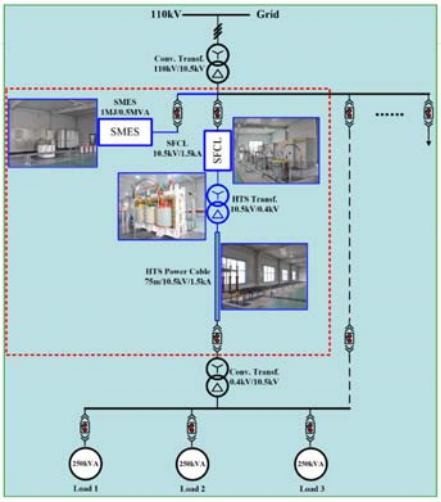


Рис. 6. Разработанная в Китае сверхпроводящая силовая подстанция.

Генеральным директором ИТЕР Бернаром Биго был сделан доклад по текущему состоянию проекта. В докладе кратко изложена история создания термоядерных установок в мире, а также истории проекта, рассмотрены основные этапы изготовления компонентов ИТЭР участниками проекта. На сегодняшний день проект ИТЭР вошел в финальную стадию. На 31 августа 2015 года произведено и отправлено в Европу 70% сверхпроводника для полоидальных и тороидальных катушек магнитной системы для удержания плазмы. Японией, Россией и европейскими участниками проекта ведутся работы по созданию каркасов катушек тороидального и полоидального полей. Проводятся работы по разработке и изготовлению ВТСП токовводов с рабочим током 70 кА. Активно идет строительство комплекса, где будет расположен термоядерный реактор и инфраструктура для его обслуживания (Рис. 7).

Райнер Мейнке (Advanced Magnet Lab, Inc USA) доложил о разработке системы радиационной защиты космических аппаратов на основе ВТСП. Высокий уровень радиации, обусловленной заряженными частицами, является главным препятствием для исследования солнечной системы. Поскольку пилотируемые миссии на Марс или к астероидам будут длиться многие месяцы, для снижения уровня дозы радиационного облучения необходима экранировка жилых отсеков космического корабля.

Рис. 7. Строительная площадка ITER (конец августа 2015 года).

Проведен анализ спектра космического излучения, дана оценка риска космической радиации, при которой космонавты будут получать дозу 1-2 мЗв/день. Рассмотрены проекты активной радиационной защиты, отклоняющей заряженные частицы магнитным полем. Обоснован выбор ВТСП проводника для магнитной системы, проведен расчет и разработана конструкция защитного экрана для использования в космических аппаратах с учетом требований по радиационной безопасности и жизнедеятельности человека в космическом аппарате.

Йонас Жмудинас (California Institute of Technology, USA) доложил о разработке и создании детекторов кинетической индукции для астрофизики. В двужидкостной модели, предложенной в 1934 г. Хайнцем Лондоном, ток в сверхпроводнике включает в себя потоки спаренных куперовских пар электронов и нормальных электронов-квазичастиц. Пары не имеют потерь, но обладают инерцией, в то время как нормальные электроны диссипативны. Таким образом, куперовские пары вносят вклад в кинетическую индуктивность, в то время как нормальные электроны вносят вклад в электрическое сопротивление. Поглощение энергии, например, фотонами, приводит к разрушению пар на отдельные квазичастицы, что в свою очередь, приводит к изменениям, как индуктивности, так и сопротивления, которые могут быть с высокой точностью измерены резонирующей схемой. За прошедшие пятнадцать лет эта идея привела к созданию датчиков для астрофизических измерений в широком диапазоне длин волн: от миллиметрового до оптического.

Помимо пленарных докладов на конференции было представлено достаточно много устных докладов: по ВТСП кабелям с высокой токонесущей способностью; сверхпроводниковыми ндуктивным накопителях энергии; ВТСП электрическим машинам; сверхпроводниковым высокополевым магнитам; ВТСП ограничителям тока короткого замыкания; ВТСП трансформаторам; медицинским применениям сверхпроводников и др. Наиболее интересными было несколько приглашенных докладов.

Доклад Франка Мершеля (RWE Deutschland AG, Germany) посвящен текущему статусу проекта Ampacity, начатому в сентябре 2011 г. Целью проекта являлась разработка энергосистемы с рабочим напряжением 10 кВ и мощностью 40 МВА, состоящей из ВТСП ограничителя тока короткого замыкания и ВТСП кабеля длиной в 1 км, проложенного в черте города Эссен, Германия. После предварительных испытаний система была запущена в эксплуатацию, и с марта 2014 г. передает электроэнергию в центр Эссена, Рис. 8.

В докладе Гена Нищиджимы (National Institute for Materials Science, Japan) рассказывается об успешной модернизации магнитной системы ЯМР спектрометра с частотой 920 МГц (21,6 Тл) до 1020 МГц (24 Тл) путем включения во внутреннюю секцию магнита обмотки из Bi-2223 проводника. Модернизация позволила достичь однородности магнитного поля лучше, чем 1 ppm и временной устойчивости лучше, чем 1 ppb за 10 часов.

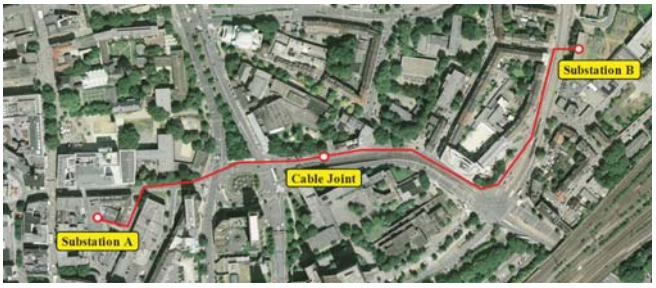


Рис. 8. ВТСП кабель проекта Ampacity, г. Эссен, Германия.

В докладе Густаво Сермьенто (TECNALIA Inspiring Business, Spain) описывалось создание и испытания магнитной системы для 10 МВт ветрогенератора на основе MgB_2 проводника.

Доклад Лучио Росси (ЦЕРН, Швейцария) посвящен разработке и созданию ВТСП токонесущего элемента на ток до 10 кА для перспективных ускорительных диполей с полем 20 Тл.

Можно сделать вывод, что благодаря развитию технологии как НТСП, так и ВТСП сверхпроводящих материалов, устройства на их основе найдут широкое применение в электроэнергетике, ускорительной технике и медицине. Значительные средства вкладываются в развитие сверхпроводниковой индустрии в США, Европе и Азии. В разработке находится множество совместных международных проектов. Все это, дает надежду на дальнейшее развитие, как технической, так и фундаментальной сверхпроводимости.

Материал подготовлен на основе презентаций, представленных на конференции EUCAS-2015, проходившей в начале сентября в Лионе, Франция.

П.Н. Дегтяренко

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Разработка и создание токонесущих элементов типа Ребель в Технологическом Институте Карлсруе по состоянию на 2015 г.

На конференции EUCAS 2015 (Лион, Франция) «Премия передового опыта и профессионализма» была присуждена сотруднику немецкого Технологического Института Карлсруе (Karlsruhe Inst Technology, KIT) Вилфриду Голдакеру за его особый вклад в развитие сверхпроводимости, в частности, за разработку кабелей типа Ребель. В своей благодарственной речи [1] доктор Голдакер осветил основные успехи его научной группы в создании сильноточных ВТСП-2 токонесущих элементов. За последние 5 лет в KIT сильно продвинулись в этом направлении.

О другом крупном разработчике кабелей типа Ребель – компаний IRL (Industrial Research Ltd) из Но-

вой Зеландии, можно прочитать в нашем предыдущем обзоре:
http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/bulletein.php?menu=bull_subj&id=1191

Работы по кабелям типа Ребель в KIT являются частью большого проекта ЦЕРН EuCARD-2 «Enhanced European Coordination for Accelerator Research & Development», финансируемого Еврокомиссией [2]. Конечной целью работы является создание диполей для модернизации Большого Адронного Колайдера, а в дальнейшем для проекта Future Circular Collider, FCC. Диполи должны работать в жидком гелии при 4,2 К и создавать поле в 20 Тл, из которых 5 Тл или 15 Тл приходятся на ВТСП вставку. Проект объединил усилия 40 партнеров из 15 стран: IEE (Inst Electrical Engineering) Братислава, IFW(Inst Festkorper Werkstofforschung) Дрезден, Университет Колламбуса, Огайо США, Advanced Conductor Technologies Co, Университет Болонии, ATI (Atominstitut) Университет Вены, наши соотечественники из Суперокс, Комиссариат ядерной энергетики Сакле (Франция), Университет г. Твент (Голландия), Университет Женевы, компания Брукер и др.

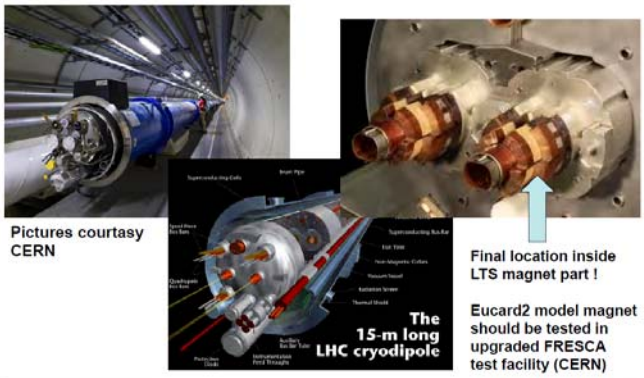


Рис.1. Диполи БАК.

Основные подходы KIT при изготовлении кабелей типа Ребель:

- эксперименты с лентами разных производителей (SuperPower, Bruker, Суперокс, Theva, Sunam);

- автоматизированная механическая резка высокой точности;

- герметизация ВСТП стрендов медью со всех сторон (для предотвращения деградации при термоциклировании);

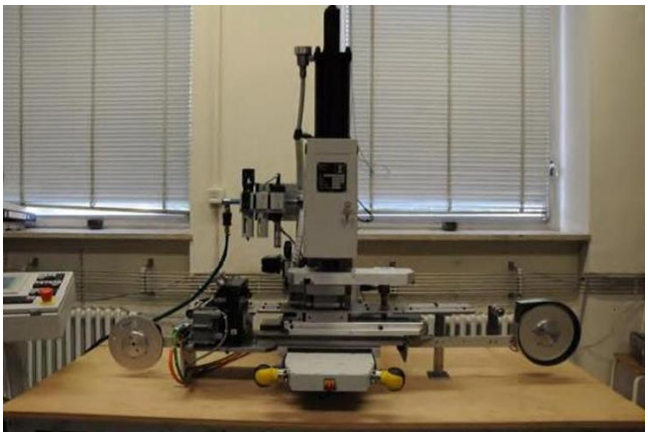
- импрегнирование готового кабеля эпоксидной смолой в смеси с диоксидом кремния (для борьбы с пондеромоторными силами в будущих соленоидах). (Удалось победить деградацию при термоциклировании проклеенных кабелей);

- лазерное скрайбирование ВТСП слоя на тонкие жилы (для снижения потерь на переменном токе);

- огромное внимание к математическому моделированию.

Технология “Punch-and-coat”

В KIT сделали специальную машину (Рис.2), которая позволяет зигзагообразно нарезать ВСТП ленты при подаче с катушки на катушку, что в будущем позволит получать кабели типа Ребель длиной более 100 м. Все параметры резки (шаг и геометрию зигзагов можно настраивать). Процесс наладки машины был непростым. На Рис.2 также показаны примеры возникавших вначале дефектов. После ряда усовершенствований деградацию критического тока стренда удалось снизить до 1,4% по сравнению с исходной лентой. Второе направление исследований KIT – разработка технологии «запечатывания» стренда-зигзага сплошным медным покрытием (включая торцы). Работы идут в сотрудничестве с компанией Суперокс, которая уже добилась здесь заметных успехов (их 2,4 метровый образец кабеля типа Ребель из 15/5 стрендов с гальванически выращенным слоем меди на торцах выдержал 200 термоциклов 300К/77К без какой-либо деградации критического тока – Рис.3). Сейчас KIT и Суперокс активно сотрудничают.



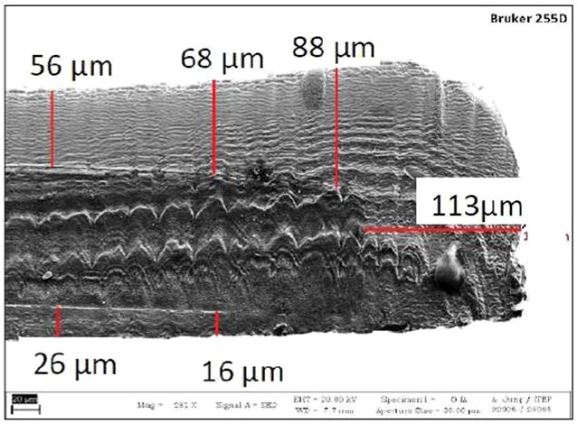
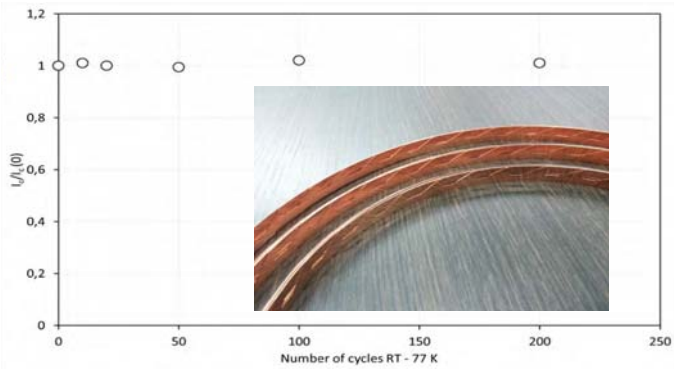


Рис. 2 Машина KIT для резки ВТСП лент на зигзаги-стренды, примеры дефектов в стрендах после резки ВТСП лент фирмы Bruker.



SuperOx 2G HTS Roebel cable SR-5-15-300-PaC-20Cu-60H7	# SR-2015-0
Strand technology	Punch-and-Coat
Strand width	5 mm
Number of strands	15
Transposition length	300 mm
Cable length	2.4 m
Substrate	Hastelloy C276 (nonmagnetic), 60 µm
Copper layer, surround	20 µm
Original tape I_c (77K, s.f.)	300 A
Average strand I_c (77K, s.f.)	120 A
Original SuperOx 2G HTS wire ID	4F-21

Рис. 3. Кабель типа Ребель из 15/5 стрендов, изготовленный из ВТСП ленты СуперОкс по технологии “Punch-and-coat”, деградации при термоциклировании нет.

Свойства кабелей типа Ребель в жидком азоте

На Рис.4 приведено сравнение критических токов в жидком азоте для кабелей, собранных в KIT из ленты Superpower и Суперокс. Достигнуты хорошие результаты: кабель из 31 стренда на основе лент Суперокс может нести ток до 2,7 кА в собственном поле при 77 К, что соответствует инженерной плотности тока в 125 А/мм^2. Перераспределение токов между стрендами начинается при I = 0,5 I_c. Критический ток каждого стренда различен, поскольку зависит от неоднородности магнитного поля внутри скрутки. Влияние собственного поля всего кабеля снижает ток каждого стренда на 40-60 %, по сравнению с одиночным стрендом.

Свойства при 4,2 К в магнитных полях 0-10 Тл

Кабели, собранные в Германии (KIT) и новозеландскими компаниями IRL и GCS (General Cable Superconductors), были испытаны на установке FRESCA в ЦЕРНе. Оба кабеля имели ширину 12 мм. Кабель KIT толщиной 0,59 мм состоит из 10 стрендов, кабель GCS выполнен из 15 стрендов, его толщина - 0,85 мм. Шаг транспонирования кабеля KIT-126 мм, а GCS - 300 мм. Результаты измерений показаны на Рис.5. При температуре 4,2 К в собственном поле достигнут ток 14 кА (1,1 кА при 77 К, s.f.). Несмотря на меньшее количество стрендов в кабеле KIT, его токонесущая способность не уступает кабелю GCS.

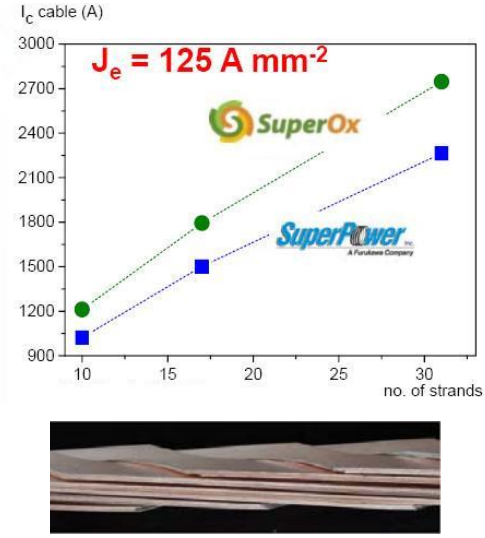


Рис. 4. Результаты сравнительных испытаний кабелей типа Ребель из лент SuperPower и Суперокс при 77 К.

Теоретически, увеличивая шаг транспонирования кабеля (L_p) и увеличивая число стрендов в стопке, можно получать кабели со сверхвысокими токами: при L_p=0,4 м /31 критический ток кабеля может достичь более 40 кА (4,2 К, s.f.); при L_p=1,8 м /100 ток может быть больше 80 кА (4,2 К и 13,5 Тл), что соответствует рабочим условиям в будущем токамаке DEMO.

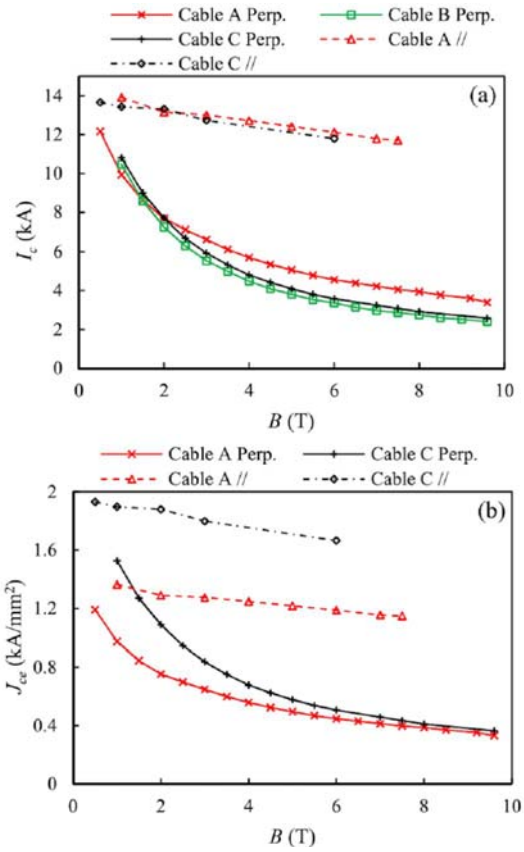


Рис.5. Полевые зависимости критического тока для кабелей типа Ребель при 4,2 К: Кабель *A* произведен новозеландской компанией GCS, а кабель *C* собран в Карлсруе [3].

Соленоиды и галеты из кабелей типа Ребель

Отдельное направление экспериментов KIT – поиск оптимальных способов создания обмоток из кабелей типа Ребель. При слоевом и галетном способе намотки присутствует сильное влияние величины магнитного поля и его направления на критический ток ВТСП ленты. При слоевой намотке наиболее слабое место находится на торцах соленоида, а при галетной - во внутренних витках между слоями.

В работе [4] исследованы модельные галеты из пятиметровых отрезком кабеля типа Ребель, плотность намотки витков изменялась при помощи прокладок.

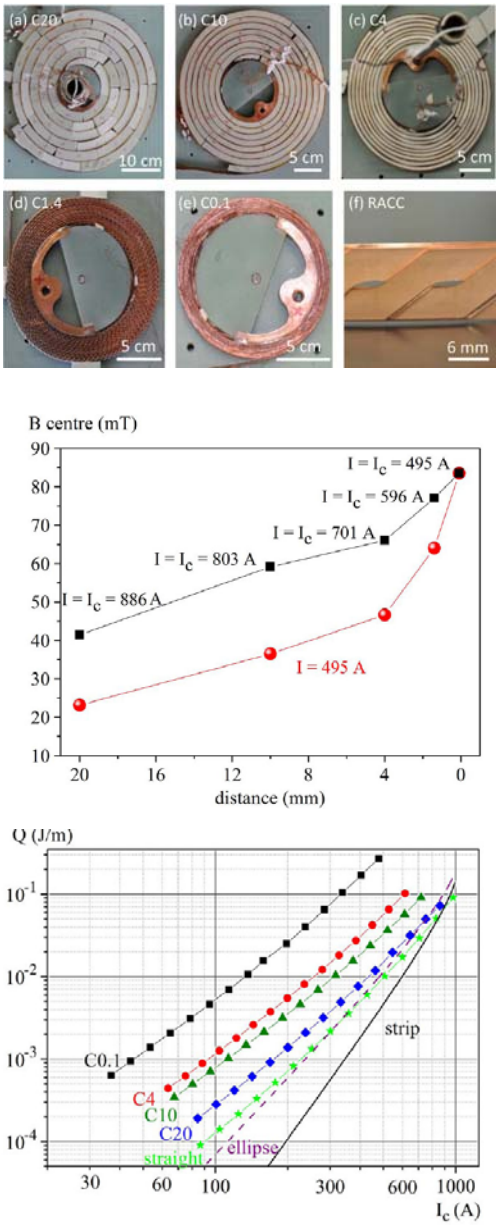


Рис.6. Галеты из кабеля типа Рёбель 10/5,5 с различным расстоянием между витками, зависимость магнитного поля от зазора, зависимость потерь на переменном токе от транспортного тока.

Из 50 м ВТСП ленты производства Superpower шириной 12 мм (подложка 100 мкм + 40 мкм слой Cu, I_C = 348 A, 77K, s.f.) нарезали 5,5 мм зигзаги. Затем стренды разрезали на куски длиной 5 м и собирали кабели 10/5,5, из которых были намотаны пять галет в положении «ВТСП слоем наружу» с различным зазором между витками: от 20 мм до 0,1 мм. Результаты измерений в жидком азоте приведены на Рис.6.

Если кабель намотан туго, несмотря на наименьший критический ток, обмотка генерирует наибольшее магнитное поле. С другой стороны, плотность намотки очень сильно влияет на потери на переменном токе в галете. Потери в обмотке всегда выше, чем в отдельном токонесущем элементе. Только в случае рыхлой галеты (20 мм между витками) они растут незначительно, а для плотной катушки, потери могут возрасти почти в пятьдесят раз.

Интересно, что если оперировать не критическим током, а магнитным полем в центре обмотки, то зависимости потерь от магнитного поля в центре для обмоток с различными зазорами между витками наложатся друг на друга. Другими словами, чтобы намотать галету с заданным значением центрального поля и заданным уровнем потерь на переменном токе, нужно просто подобрать расстояние между витками.

Механические свойства и пропитка

В обмотках с высоким магнитным полем проводник подвергается сильным поперечным механическим нагрузкам. Кабели типа Ребель очень чувствительны к поперечным механическим нагрузкам. На углах зигзагов происходит излом ВТСП стрендов, при поперечных механических напряжениях в кабеле выше 70 МПа происходит необратимая деградация его критического тока[5].

В магнитных системах из низкотемпературных сверхпроводников эту проблему решают путем проклейки витков. Однако, в последние годы появились много сообщений о неудачах с импрегнированием ВТСП обмоток эпоксидной смолой: ленты расслаиваются из-за разности коэффициентов температурного расширения.

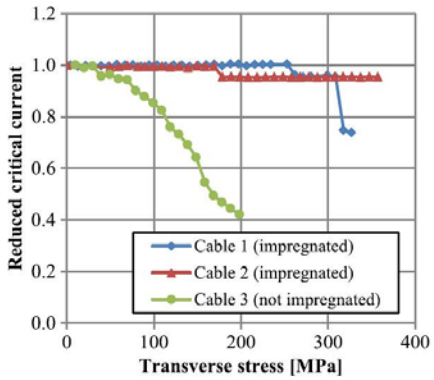


Рис. 7. Механические свойства кабелей типа Ребель, пропитанных эпоксидной смолой с добавкой оксида кремния, измерения при 4,2 К в 11 Тл.

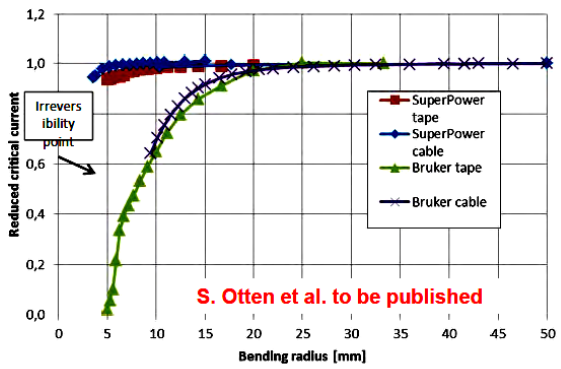


Рис. 8. Зависимость нормированных критических токов от радиуса изгиба для кабелей типа Ребель и ВТСП лент.

Во-первых, стренды кабелей типа Ребель, поскольку имеют обрезанные края, еще более чувствительны к такому воздействию. Во-вторых, ReBCO слой может химически реагировать с компаундом. Все это вызывает необратимую деградацию. Кроме того, тепловая и электрическая изоляция проводника снижает стабильность обмотки.

Однако специалистам из KIT удалось найти особые присадки в виде оксида кремния и др., которые позволили получить импрегнированные токонесущие элементы, не деградирующие при приложении поперечного механического напряжения, Рис. 7 [6]. Благодаря проклейке и опрессовке, кабели смогли выдержать без деградации нагрузку в 150 МПа при 4,2 К и 11 Тл.

На Рис. 8 показаны результаты испытаний на изгиб в жидком азоте изготовленных в KIT кабелей типа Ребель. Образец кабеля из ВТСП лент SuperPower показал хорошие результаты (как и у одиночной ленты) при минимальном радиусе изгиба 10 мм. Кабель из ВТСП лент Bruker оказался несколько хуже ($R_{доп}$< 20 мм).

Лазерное скрайбирование

Метод разбивания сплошного ВТСП слоя на узкие полоски (скрайбирование), с одной стороны, снижает критический ток каждого стренда, с другой стороны, позволяет радикально снизить потери на переменном токе, см. Рис. 9, 10.

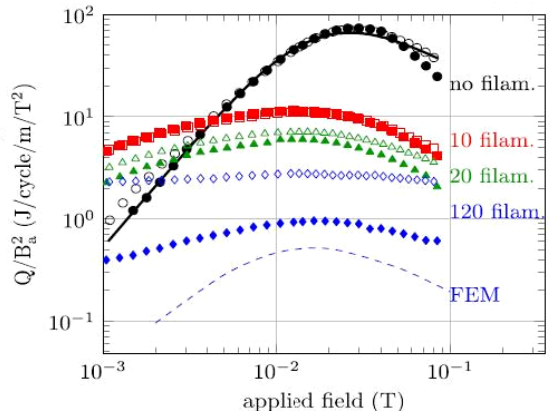


Рис. 9. Потери на переменном токе в кабелях типа Ребель со скрайбированными стрендами.

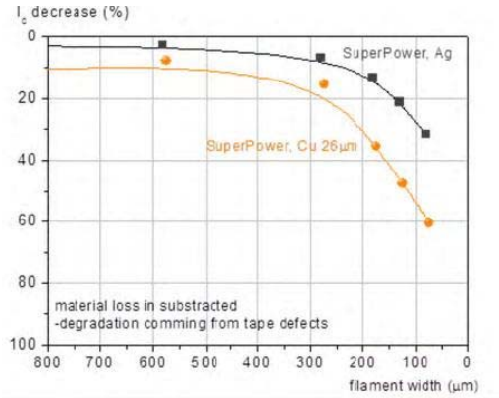


Рис. 10. Падение критического тока при скрайбировании.

Сильноточный токонесущий элемент на основе Ребеля

Для перспективного термоядерного реактора DEMO потребуются проводники с рабочими токами более 20 кА в магнитном поле 12-15 Тл. Для решения этой задачи в KIT разрабатываются сильноточные токонесущие элементы, в которых в качестве стрендов будут использованы не отдельные ВСТП ленты, а кабели типа Ребель[7].

Первый вариант такого токонесущего элемента, выполненного в виде кабеля Резерфордовского типа, оказался неудачным. Возник целый ряд проблем с пайкой и деградацией критического тока при изломе ВТСП лент на острых гранях формера.

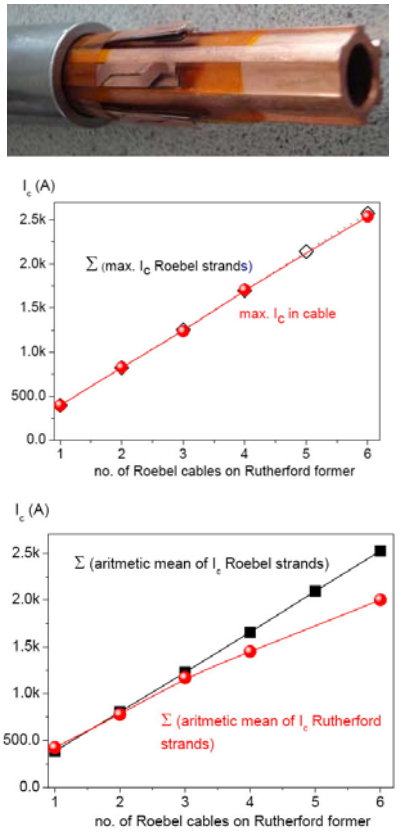


Рис.11. Сильноточный токонесущий элемент со стрендами из кабелей типа Ребель, критический ток 2,5 кА (77 К, s.f.)

На Рис. 11 показана новая конструкция токонесущего элемента с круглым формером, в шести спиральных канавках которого располагаются кабели Ребель из 10 стрендов, произведенные компанией GSC, Новая Зеландия. Шаг скрутки токонесущего элемента составил 0,66 м при длине образца 0,99 м.

Перераспределение токов между кабелями контролировали на каждом этапе сборки. В результате, в токонесущий элемент был успешно введен ток 2,5 кА (77 К, s.f.), что соответствовало расчетной сумме критических токов отдельных кабелей типа Ребель.

Из приведенного обзора видно, что тема объединения ВТСП лент 2-го поколения в токонесущие элементы находится в постоянном развитии. Ей уделяется большое внимание во многих странах. Впрочем, это понятно, так как работы по термоядерному синтезу и физике высоких энергий с каждым годом предъявляет к производителям сверхпроводников все более и более жесткие требования.

Д.И. Шутова

1. *Wilfried Goldacker , Презентация «ESAS Award of excellence 2015 my speech» Wilfried ESAS Award Plenary - EUCAS2015 - Lyon Sept. 7th-10th, 2015*

2. *http://eucard2.web.cern.ch/*

3. *Electrical characterization of RE-123 Roebel cables J. Fleiter, A. Ballarino, L. Bottura, P.Tixador, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 065014 (5pp)*

4. *A Kario, M Vojenciak, F Grilli, A Kling, A Jung, J Brand, A Kudymow, J Willms, U Walschburger, V Zermeno, and W Goldacker, DC and AC Characterization of Pancake Coils Made From Roebel-Assembled Coated Conductor Cable, IEEE TRANS ON APPL. SUPERCOND., VOL. 25, NO. 1, FEBRUARY 2015*

5. *J. Fleiter et al. "Electrical characterization of REBCO Roebel cables", Supercond. Sci. Technol. 26 (2013)*

6. *A. Kario, S. Otten, M. Dhallé, P. Gao, W.A.J. Wessel, A. Kling, R. Nast, U. Walschburger, N. Bagrets, S. Drotziger, W. Goldacker, Презетация Options for epoxy impregnation of REBCO Roebel cables , 2014*

7. *A. Kario, A. Kling, A. Jung, B. Runtsch, W. Goldacker, презентация Round Rutherford cable concept with HTS Roebel Coated Conductors strands, Institute for Technical Physics, Karlsruhe Institute of Technology, 2014*

НТСП УСТРОЙСТВА

Новый детектор для обновленного БАК и FCC

В последнее время активно обсуждаются планы по модернизации большого адронного коллайдера (БАК), которые включают в себя как значительное увеличение магнитного поля диполей и квадруполей при сохранении существующего диаметра ускорительного кольца, так и постройку совершенно нового ускорителя с диаметром кольца до 100 км и сверхпроводниковой магнитной системой с характеристиками на грани современных технологических возможностей (проект Future Circular Collider, сокращенно FCC).

Не стоит забывать, что любой современный ускоритель не ограничивается магнитной системой для ускорения заряженных частиц, сверхпроводниковые магниты детекторов давно стали неотъемлемой частью любого ускорительного комплекса. Сверхпроводниковые магнитные системы установленных на большом адронном коллайдере детекторов ATLAS и CMS до сих пор остаются одними из крупнейших сверхпроводниковых устройств.

На недавно прошедшей конференции EUCAS-2015 был представлен разработанный командой ЦЕРН проект магнитной системы перспективного детектора для FCC. Предлагается создание устройства циклопических размеров с массой в несколько тысяч тонн и с запасенной энергией 56 Гдж, что в 35 раз больше, чем у детектора ATLAS и в 20 раз больше, чем у CMS. Внешний вид магнитной системы детектора изображен на Рис. 1, крохотная точка внизу рисунка, это человек. Сверхпроводниковый магнит будет достигать 43 м в длину при максимальном диаметре 27 м.

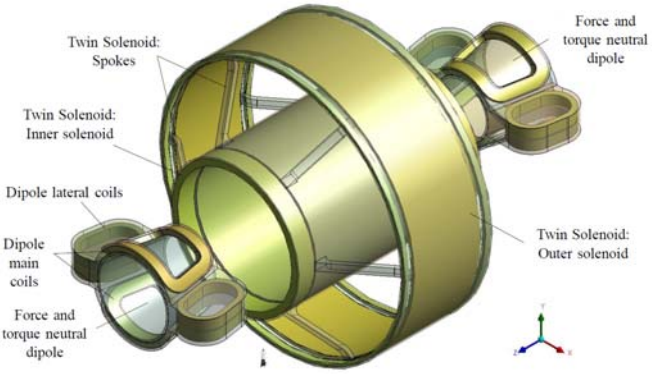


Рис. 1. Общий вид магнитной системы перспективного детектора FCC.

Магнитная система детектора будет состоять из двух коаксиальных соленоидов: внутреннего с полем в 6 Тл и внешнего соленоида, который служит для магнитного экранирования. Использовать для этих целей железо, как это было сделано в магните CMS, невозможно, так как в этом случае масса установки превысит все разумные пределы. Диаметр и длина внутреннего соленоида составят 14 м и 20 м, размеры внешнего соленоида будут составлять 27 м и 10 м. Магнитные поля соленоидов детектора направлены в разных направлениях, в промежутке между соленоидами создается магнитное поле в 2,8 Тл, которое используется для обнаружения мюонов. На краях магнитной системы располагаются диполи, сложная форма которых обусловлена требова-

ниями на взаимную компенсацию сил и крутящих моментов.

В сверхпроводниковых магнитах детектора предполагается использовать токонесущие элементы на основе ниобий-титановых проводников. Для внешнего и внутреннего соленоидов будет использована скрутка из ниобий-титановых и алюминиевых жил диаметром 64 мм, заключенная в оболочку из высокопрочного алюминиевого сплава сечением 90x90 мм. Большая часть от сечения токонесущего элемента - 60% - будет приходиться на его оболочку, еще 34% сечения займут жилы алюминиевого стабилизатора и пустоты между ними, сверхпроводник займет лишь 6%. В токонесущем элементе предполагается использовать ниобий-титановый стренд с коэффициентом заполнения по сверхпроводнику 50%. Рабочий ток такого токонесущего элемента составит 80 кА при критическом токе около 400 кА (для 4,6 К и 6,4 Тл). Распределение магнитного поля в обмотках соленоидов детектора FCC показано на Рис. 2.

Для оболочки токонесущего элемента предполагается использовать сплавы Al-6060-T6 или Al-7020.72, предел текучести которых при температуре 4,5 К составляет соответственно 350 МПа и 700 МПа. Предельная величина механических напряжений в обмотках соленоидов выбрана на уровне 70 МПа. Столь низкой величины механических напряжений удалось добиться при помощи конической опорной структуры и специальных боковых обмоток, без них механические напряжения в диполях превышали бы 150 МПа.

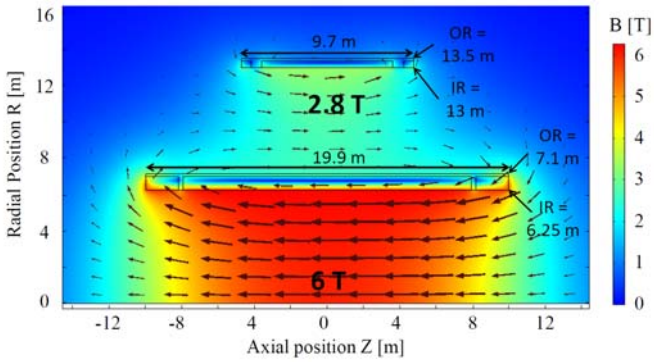


Рис. 2. Распределение магнитного поля в соленоидах детектора FCC

В диполях будет использован токонесущий элемент аналогичной конструкции с уменьшенным сечением и рабочим током 20 кА. Более половины холодной массы магнитной системы диполя приходится на удерживающую обмотки опорную структуру. Предельные механические напряжения в обмотках диполей также будут на уровне 170 МПа. Основные параметры обмоток соленоидов и диполей детектора представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры сверхпроводниковых обмоток детектора FCC

Соленоиды	
Запасенная энергия	56 ГДж
Общая масса	5600 т
Масса сверхпроводника	2300 т
Масса криостатов и опорной структуры	2200 т
Рабочий ток	80 кА
Индуктивность	16,6 Гн
Максимальное поле на обмотке	6,44 Тл
Температура после перехода в нормальное	88 К
Диполи	
Запасенная энергия	1,5 ГДж
Холодная масса	375 т
Масса сверхпроводника	138 т
Рабочий ток	20 кА
Индуктивность	7,5 Гн
Максимальное поле на обмотке	6 Тл

На первый взгляд, для создания такого детектора требуется огромное количество сверхпроводника, которое в разы превосходит мировой объем производства (около 600 тонн для ниобий-титановых проводов). Однако, необходимо отметить, что на сверхпроводящий провод приходится лишь 6% от всего сечения токонесущего элемента, остальной объем которого заполнен алюминиевыми жилами и оболочкой. Потребности магнитной системы детектора FCC в сверхпроводящем проводе можно оценить на уровне 500 тонн, что по масштабам, сопоставимо с затратами на ИТЭР.

Очевидно, что такой крупный ускоритель как FCC одним детектором не ограничится. Будем ждать дальнейших новостей из ЦЕРН.

В.И. Щербаков

Matthias Mentink, Alexey Dudarev, Helder Filipe Pais Da Silva, Christophe Paul Berriaud, Gabriella Rolando, Rosalinde Pots, Benoit Cure, Andrea Gaddi, Vyacheslav Klyukhin, Hubert Gerwig, Udo Wagner, and Herman ten Kate, «Design of a 56 GJ Twin Solenoid & Dipoles Detector Magnet System for the Future Circular Collider» IEEE/CSC & ESAS SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM (global edition), January 2016. EUCAS 2015 preprint 1A-LS-P-05.08. Submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond. for possible publication.

Отделение сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-технологий

Сайт «Сверхпроводники в электроэнергетике»

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

Научный редактор: *В.С. Круглов,* руководитель отделения сверхпроводимости

Редактор: *В.И. Щербаков*

В подготовке выпуска принимали участие: *П.Н. Дегтяренко, Д.И.Шутова*

А.К. Чернышева Chernyshova_AK@nrcki.ru,

Верстка: *И.Л. Фурлетова*