

УДК 537.312

## **Школа по прикладной сверхпроводимости "Курчатовец-2000"**

*И. С. Байков*

Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации —  
федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности, Москва,  
Россия

*В. С. Круглов*

Институт сверхпроводимости и физики твердого тела, РНЦ "Курчатовский институт",  
Москва, Россия

*Л. С. Ширшов*

Институт физики высоких энергий, г. Протвино, Моск. обл., Россия

С 21 по 26 мая 2000 года на базе РНЦ КИ "Курчатовец", вблизи г. Протвино, прошла Школа по прикладной сверхпроводимости, организованная Институтом сверхпроводимости и физики твердого тела, РНЦ "Курчатовский институт", Секцией сильноточной сверхпроводимости направления "Сверхпроводимость" Государственной научно-технической программы

"Актуальные направления в физике конденсированных сред", Научным советом РАН "Научные проблемы использования сверхпроводимости в электротехнике и энергетике". Председатель оргкомитета школы профессор В. Е. Кейлин отметил, что Минатом России и Миннауки России оказали финансовую поддержку, которая сделала возможным проведение такого масштабного мероприятия. Среди участников Школы преобладала молодежь, что дает надежду на возрождение российской науки.

В работе Школы участвовало более 80 специалистов из 19 организаций России и зарубежья, представивших 40 докладов-лекций, посвященных прежде всего техническим вопросам сильноточной сверхпроводимости, включая сверхпроводящие материалы (НТСП и ВТСП), сверхпроводящие магнитные системы и их всевозможные применения, сопутствующие проблемы криогенной техники. Интерес к технической стороне сверхпроводимости вовсе не был случайным, поскольку в настоящее время финансируются только проекты с реальным выходом и значимыми результатами. Сверхпроводимость уже давно перешла из разряда экзотических явлений в сферу прикладного использования, и успехи здесь заметны и видны не только узким специалистам.

В качестве примера таких реальных технических достижений можно указать на проведение весной этого года в Японии испытаний большой модельной катушки для проектируемой международной установки ИТЭР. Катушка с обмоткой на основе соединения ниобий—олово имеет длину около 3 м и внутреннее отверстие диаметром 1,5 м, в котором создается рекордное для таких установок магнитное поле индукцией 13 Тл. В токонесущий кабель толщиной с руку был введен ток 46 кА, пока в режиме медленного подъема тока, но летом состоится испытание обмотки при быстром нарастании тока. Вклад российской стороны в программу модельных катушек ИТЭР был представлен в докладе С. А. Егорова и И. Ю. Родина (НИИЭФА) о создании российской модельной катушки-вставки ИТЭР.

В докладе Л. М. Фишера (ВЭИ, Москва) "Размерный эффект в жестких анизотропных сверхпроводниках" исследованы ВТСП-материалы с ярко выраженной анизотропией, где свойства материала меняются по объему от точки к точке. Традиционная модель Бина не подходит для объяснения материалов со слоистой структурой. По мере того как технологи начинают производить образцы ВТСП все более качественно, становится труднее измерять их характеристики, поскольку на плохих образцах все эффекты были выражены более явно. Для измерения параметров образцов предложено наносить на исследуемый кубик вещества систему из двух возбуждающих катушек, размещенных ортогонально. Система из двух измерительных катушек, смещенных по азимуту, позволяет регистрировать влияние магнитного поля, направление которого задается исследователем по выбранной программе. Данная методика позволяет исследовать анизотропию ВТСП-образцов.

Доклад В. Е. Кейлина (РНИЦ КИ, ИСФТТ) был посвящен разработке и успешному использованию ВТСП-материалов для обмоток магнитных систем. Трудности при изготовлении реальных конструкций заключаются в сильной зависимости токонесущей способности ВТСП от магнитного поля и вызваны также механическими проблемами из-за хрупкости материала. Понижение температуры от азотного уровня позволяет снизить влияние магнитного поля. Длина образцов из ВТСП достигает уже значений порядка нескольких сотен метров, а использование ленточек на основе висмута позволяет избежать механических проблем. В настоящее время ВТСП-материалы в конструкциях используются в катушках подмагничивания токоограни-

чителей и лабораторных магнитов. Изготовлена модель трехфазного ограничителя тока на основе ВТСП. При температуре жидкого азота найдена своя ниша для ВТСП, которые используются для насыщения железа обычных магнитов до значения 1,8 Тл, причем новые материалы уже стали выгодней привычной меди. Многослойная катушка ВТСП компаудирована, а для улучшения стабилизации используется медный каркас, который способен "затянуть" переход в нормальное состояние.

Другой областью внедрения новых материалов стали новые типы электрических машин с объемными ВТСП-элементами, играющими роль ротора. Состояние разработок в мире и отечественные проекты были рассмотрены в следующих докладах сотрудников Московского авиационного института (МАИ): "Синхронные ВТСП-двигатели с композитным YBCO-ротором" (С. А. Ларионов) и "Гистерезисные двигатели с объемными YBCO и пластинчатыми Bi—Ag композитными материалами" (К. А. Модестов).

Эти сообщения наглядно представили успехи наших специалистов в разработке электрических машин высокой мощности. Причем создание таких моторов не требует разработки ВТСП-проводов, поскольку принцип работы опирается на объемную намагниченность массивного ротора, выполненного на основе керамики, и можно полагаться на отработанные технологии по изготовлению таких образцов. При температуре жидкого азота ВТСП-провода достаточно хорошо работают, поэтому используются объемные роторы с анизотропией по азимуту. В ряде устройств ВТСП-материалы комбинируются с железом, что позволяет получить в якоре две ортогональные плоскости, в которых одна ось — ферромагнитная, а другая — диамагнитная. Для уменьшения потерь на трение используется левитирующий подвес.

Под руководством профессора Л. К. Ковалева сотрудники МАИ создали устойчивую кооперацию с ВЭИ, ВНИИНМ им. Бочвара (Москва) и ИФТТ (Черноголовка), в которую входит ряд германских фирм. Основной задачей является разработка двигателя мощностью 100 кВт, работающего в жидком азоте. Уже созданы и прошли испытания двигатели на 20 и 38 кВт. В рамках программы АНТК им. Туполева по созданию криогенного самолета, использующего в качестве топлива жидкий водород, ведется разработка авиационного насоса. Создана модель такого устройства, имеющего ярмо диаметром всего 70 мм при мощности 4 кВт и частоте вращения вала до 24 тыс. об./мин. Основным преимуществом такого рода электрических машин является улучшение массогабаритных характеристик, что особенно важно при использовании в составе авиационно-космической техники.

Значительным событием Школы стало проведение "круглого стола" по проблеме создания токовода на основе ВТСП-материала. Е. Кейлин осветил историю совершенствования конструкции токопровода к приборам, расположенным в низкотемпературной зоне. Проблема токопровода возникла достаточно давно, а с ростом габаритов сверхпроводящих магнитных систем (СМС) и увеличением значений тока значение этого вопроса только возросло. Стандартная идеальная цифра составляла величину порядка 1 Вт/кА, поскольку имела жесткая связь между джоулевыми потерями и теплопритоком. Появление ВТСП разрушило эту порочную связь. Новые тоководы создавались на основе керамики, но они были массивными и хрупкими. Ленточные ВТСП оказались более приемлемыми, и американцы уже успели сделать и испытать такой токовод на 13 кА для Большого адронного коллайдера (ЛНС), сооружаемого в ЦЕРН. Наиболее просто оценить качество токовода по испарению гелия. В лаборатории ИФВЭ для этих целей использовался 250-литровый дьюар с проходным отверстием горловины

диаметром 50 мм. Фон испарения был малым, что позволяло просто измерить характеристики токоввода, закороченного сверхпроводящей перемычкой. Реальная форма токоввода представляет трехступенчатую конструкцию из лент висмута. Матрица с серебром и легирована добавкой одного процента золота для снижения теплопередачи. П. И. Слободчиков (ИФВЭ) сообщил, что задача создания такого токоввода появилась в процессе разработки нового оборудования для ЛНС. Свыше восьми тысяч сверхпроводящих магнитов этой установки, выполненных из низкотемпературных сверхпроводников, будут работать в сверхтекучем гелии. Теплопритоки по металлическим мо-стам, соединяющим зоны с разными температурами, доставляют много хлопот. Основным источником тепла, выделяемого в криостате, могут стать токовводы, подключенные к теплomu электротехническому оборудованию.

Для снижения теплопритоков в область низких (2,1 К) температур предложено использовать ВТСП-токовводы, диапазон рабочих токов которых составляет 600 А — 13 кА для различных типов магнитов. Около тысячи таких вводов требуется для питания током 600 А корректирующих магнитов. Скорость изменения тока может достигать 5 кА/с, а изоляция токоввода должна выдерживать перенапряжение до 1,1 кВ. Полная тепловая нагрузка через токоввод не должна превышать 80 мВт.

Ограничения применения ВТСП-материалов вызваны в настоящее время тем обстоятельством, что даже небольшое магнитное поле катастрофически снижает их токонесущую способность и разрушает сверхпроводящее состояние. Сверхпроводник, изготовленный для технического использования, представляет, как правило, сложный композит из разных материалов. Для защиты от разрушения при переходе сверхпроводников в нормальное состояние в первых образцах проволоки использовалась матрица из золота, что сказывалось на цене материала. Соленоид, намотанный из такой проволоки, получался в прямом смысле золотым. В настоящее время для тепловой стабилизации обмотки соленоида сверхпроводящие нити делают тонкими и размещают в медной матрице. Медь в этом случае работает и как электрический проводник (шунтируя участок, который перешел в нормальное состояние), и как проводник тепла, что позволяет избежать локального перегрева, вызывающего перегорание токонесущего элемента. Использование меди в качестве защитной матрицы существенно снизило стоимость материала и позволило широко использовать явление сверхпроводимости в технических устройствах. В начале 70-х годов состоялся переход к промышленному изготовлению низкотемпературных сверхпроводников, предназначенных для работы на уровне температуры жидкого гелия (4,2 К).

ВТСП-материалы в ускоренном темпе проходят этапы пути, пройденные ранее интерметаллическими соединениями. В настоящее время используют серебряные трубки, в которые загружают компоненты хрупкого висмутитового соединения. Исходная заготовка подвергается экструзии, затем следует высокотемпературный отжиг проволоки, в процессе которого получается химическое соединение необходимого состава. Для снижения теплопроводности такой проволоки в состав матрицы добавляют золото, что значительно увеличивает цену метра проволоки. Матрица играет вспомогательную роль, представляя собой своего рода "рамку для картины". Художники даже для шедевров не используют золотых рамок, но здесь иная ситуация, которая напоминает, скорее, добавление золота в краску для нанесения на холст необычного сочетания цветов.

Разработка токоввода на основе ВТСП-материала проводилась коллективом сотрудников ИФВЭ и ВНИИНМ, сформировавшимся еще в процессе работы над созданием магнитов УНК. Всероссийский НИИ неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара создан в 1945 г. для решения материаловедческих проблем в области атомной техники и располагается в Москве рядом с РНЦ "Курчатовский институт". Одним из основных направлений деятельности института в последние 25 лет стала разработка сверхпроводящих материалов и технологий их производства. Помимо созданных традиционных технических сверхпроводников, проводятся исследования и разработка многоволоконных сильноточных проводов на базе высокотемпературных оксидных соединений ВТСП. На факультативных занятиях "школьникам" из РНЦ "Курчатовский институт", ГНЦ ИФВЭ, ВНИИНМ им. акад. А. А. Бочвара и МИФИ удалось создать вариант конструкции ВТСП-токоввода корректирующих магнитов ЛНС, удовлетворяющий требованиям ЦЕРН.

В кратком сообщении невозможно осветить все доклады, представленные на Школе, но самым важным оказался обмен мнениями в неформальной обстановке о состоянии дел в области прикладной сверхпроводимости и установление личных контактов между участниками.

## **Highlights of the School on applied superconductivity, May 21—26, 2000 (base "Kurchatovets", Protvino, Russia)**

*I. S. Baikov*

The All-Russia Research Institute of Interindustrial Information — Federal Informational-Analytical  
Center of the Defense Industry, Moscow, Russia

*V. S. Kruglov*

RRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*L. S. Shirshov*

Institute of High-Energy Physics, Protvino, Russia

*A short review of the reports presented in the School (Kurchatovetch'2000) on  
most advanced achievements in the fields of high-current superconductivity is given.*