

PACS numbers: 74.72.-h, 84.70.+p, 85.25.Kx

## Состояние работ по сильноточной прикладной сверхпроводимости

Н.А. Черноплеков

### 1. Введение

Сильноточная прикладная сверхпроводимость (СПС) — это область практического использования уникальных токонесущих способностей так называемых жестких сверхпроводников 2-го рода при таких температурах и магнитных полях, которые ниже их критических значений. В сверхпроводниковых устройствах, по сравнению с устройствами традиционного исполнения из Cu или Al, обеспечиваются в 10–100 раз более высокая плотность тока в обмотке, отсутствие джоулевых потерь при работе на постоянном токе, а на переменном токе промышленной частоты потери снижаются до величин  $10^{-4}$  от потерь в резистивных обмотках. Кроме того, использование СПС позволяет создавать устройства, принципиально недоступные традиционным электротехническим технологиям, например, магнитные системы с практически незатухающим (замороженным) током и др. При стоимости современных промышленных низкотемпературных сверхпроводящих (НТСП) проводов и кабелей от 1 до 15 долл. за 1 кА м и цене медных проводов около 15 долл. за 1 кА м вопрос о целесообразности использования сверхпроводникового устройства определяется приемлемостью затрат на создание системы его криостатирования и расходов на ее эксплуатацию [1].

Как известно, работы по СПС начались спустя 50 лет после открытия сверхпроводимости. Теперь эти работы имеют 40-летнюю историю, и в их рамках обозначились две области использования сверхпроводимости. Во-первых, область безальтернативного использования, к которой относятся современные ускорители и детекторы для физики высоких энергий, установки для термоядерных исследований с магнитным удержанием горячей плазмы, магниты уникальной прецизионности, стабильности и однородности для магниторезонансной томографии, магниты предельных полей для ЯМР-спектроскопии и магниты для научных исследований в физике, химии и биологии. Другой областью является использование сверхпроводниковых устройств в общепромышленной технике, в первую очередь, в электроэнергетике, на транспорте, в горнодобывающей промышленности и других электроемких отраслях. Смелые попытки 70-х годов (особенно активные в СССР и США) включить СПС в общепромышленную область после успешной разработки и испытаний макетных образцов разнообразного сверхпроводникового электротехнического оборудования оказались неудачными как из-за стоимостных, так и надежностных характеристик сверхпроводникового оборудования того времени по сравнению с традиционным электротехническим оборудованием. В первую очередь это было связано с дороговизной и низкой надежностью криогенного оборудования гелиевого уровня температур, а в нашей стране, дополнительно, и с высокой стоимостью самого хладагента — гелия.

За время, прошедшее с 70-х годов, многое усовершенствовалось в НТСП-технологии (качество сверхпроводящих материалов, возможности гелиевой техники и

самой технологии магнитных систем), и вместе с тем, после открытия в 1986 г. так называемых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), зародилась и начала становиться на ноги ВТСП-технология, или сверхпроводниковая технология азотного уровня температур [2]. Сейчас она делает первые успехи и уже по праву может считаться законной составной частью современной СПС.

### 2. СПС гелиевого уровня температур

Это наиболее старая и развитая часть современной СПС. Ее основу с точки зрения собственно сверхпроводимости представляют два сверхпроводника. Один из них — неупорядоченный деформируемый сплав Nb–Ti с ОЦК структурой и приблизительно равным весовым соотношением компонентов. В России используется сплав НТ-50 (50 % вес. Nb и 50 % вес. Ti), в США — сплав 47 % вес. Nb и 53 % вес. Ti, являющиеся достаточно близкими по своим свойствам. Критические параметры сплавов: критическая температура  $T_K = 9,6$  К при нулевых магнитном поле и токе, верхнее критическое поле  $B_{K2} = 12$  Тл при 4,2 К и нулевом токе, соответственно длина когерентности  $\xi(0) = 4$  нм и глубина проникновения поля  $\lambda(0) = 240$  нм. В результате продолжительных и кропотливых исследований термомеханики и электродинамики этого сплава было установлено, что эффективными центрами пиннинга вихрей Абрикосова в них являются пластиначатые выделения  $\alpha$ -Ti с толщиной масштаба 2 нм, ориентированные вдоль оси провода. Была определена также совокупность процессов термомеханической обработки, позволяющая создавать в конечном изделии (проводе) близкую к оптимальной структуру центров пиннинга и устойчиво получать критическую плотность тока  $J_K = 3 \times 10^9$  А м<sup>-2</sup> при 4,2 К в поле 5 Тл. Введение искусственных центров пиннинга позволяет поднять  $J_K$  до  $5 \times 10^9$  А м<sup>-2</sup>. Как уже отмечалось, стоимость провода из Nb–Ti зависит от предназначения, но обычно не превышает 10 долл. за 1 кА м.

Второй "рабочей лошадкой" низкотемпературной СПС является хрупкое интерметаллическое соединение Nb<sub>3</sub>Sn со структурой A15, принадлежащей к классу кубических структур. Критические параметры этого соединения заметно расширяют диапазон рабочих температур и магнитных полей сверхпроводящих магнитных систем (СМС) по сравнению с температурами и полями в СМС на основе материала Nb–Ti. Критическая температура Nb<sub>3</sub>Sn при нулевых магнитном поле и токе составляет 18,3 К, а второе критическое поле равно 24 Тл при 4,2 К и нулевом (измерительном) токе, длина когерентности и глубина проникновения поля равны соответственно  $\xi(0) = 3$  нм и  $\lambda(0) = 65$  нм. Как и Nb–Ti, соединение Nb<sub>3</sub>Sn является практически изотропным сверхпроводником, и межзеренные границы в нем прозрачны для сверхпроводящего тока. В то же время интересно, что границы зерен являются эффективными центрами пиннинга, и получение "сильной" пиннинговой структуры в Nb<sub>3</sub>Sn, необходимой для высоких критических токов, означает получение оптимальной мелкокристаллической структуры. В материалах на основе Nb<sub>3</sub>Sn достижимы более высокие плотности критического тока, чем в материалах на основе Nb–Ti. Так, в промышленных образцах проводов достигаются плотности критического тока по сверхпроводнику более  $10^9$  А м<sup>-2</sup> при 4,2 К

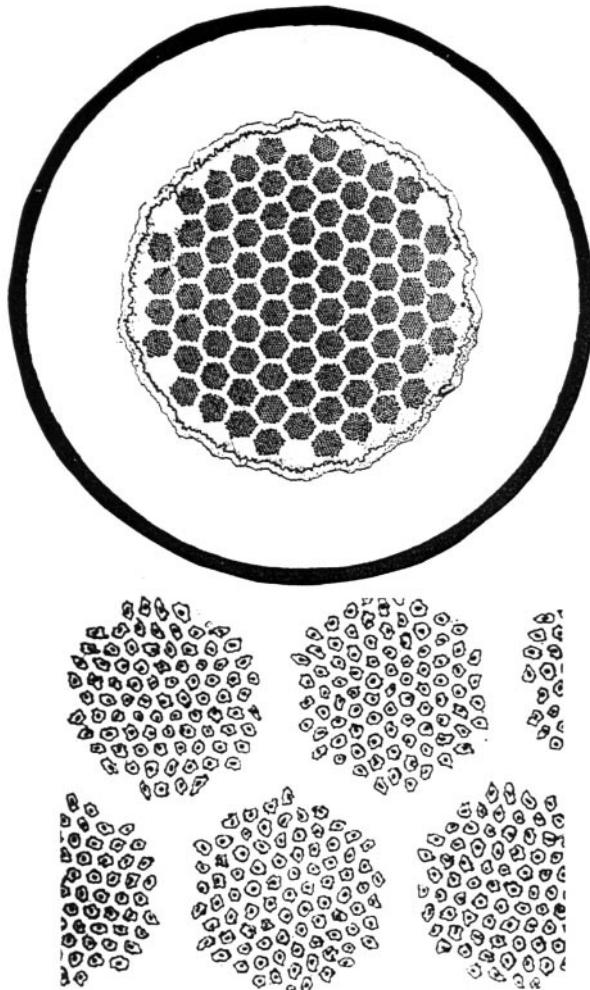


Рис. 1. Сечение стабилизированного многожильного проводника на основе Nb<sub>3</sub>Sn для Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР). В нижней части представлен увеличенный фрагмент сечения.

в поле 10 Тл. При этом следует иметь в виду, что сам провод (рис. 1) представляет собой сложную композитную конструкцию из разнородных материалов (стабилизирующих и барьерных металлов, изолятов) с многочисленными ультратонкими, до долей мкм, нитями собственно сверхпроводника, расположеными в виде спирали с определенным шагом в теле стабилизирующего металла. Постоянство свойств и размеров этих проводов должно обеспечиваться на километровых длинах, а рабочие токи — в диапазоне от единиц до десятков тысяч ампер. Производятся провода с внутренними каналами или в виде кабельных изделий внутри прочных оболочек, в которых осуществляется циркуляция хладагента. Такие токонесущие изделия особенно необходимы для создания крупных СМС, в которых развиваются близкие к предельным механические усилия взаимодействия между обмотками и предъявляются высокие требования к электрической изоляции. На рисунке 2 приведена зависимость  $J_{\text{кр}}$  от индукции магнитного поля при температуре 4,2 К. Из-за высокой хрупкости Nb<sub>3</sub>Sn и, соответственно, из-за высокой зависимости токонесущей способности от степени деформации проводника создание технологии Nb<sub>3</sub>Sn-проводов и промышленное освоение этой технологии задержалось

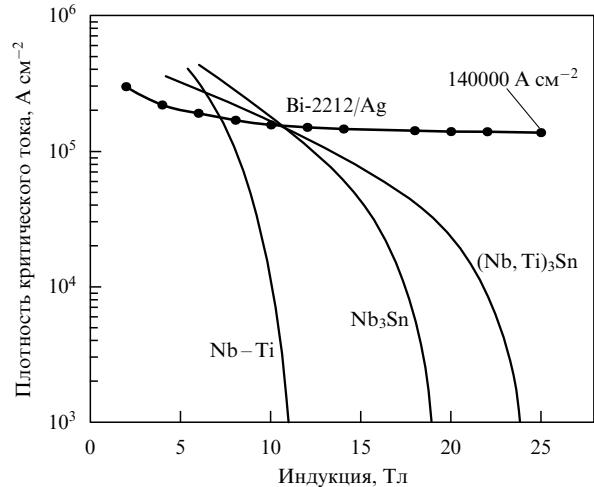


Рис. 2. Зависимость плотности критического тока от индукции магнитного поля для технических сверхпроводников при  $T = 4,2$  К.

лет на 10–15 по отношению к Nb–Ti-сверхпроводникам. В настоящее время выпуск Nb<sub>3</sub>Sn-проводов осуществляется на промышленной основе. Стоимость их колеблется от 10 до 15 долл. за 1 кА м.

Значения достижимых плотностей тока и магнитных полей, которые обеспечиваются использованием материалов на основе Nb–Ti и Nb<sub>3</sub>Sn (см. рис. 2), практически перекрывают все существующие и прогнозируемые потребности электрофизического и электротехнического оборудования. Из нескольких десятков тысяч СМС, действующих в мире, подавляющая часть изготовлена из материалов на основе Nb–Ti. Одной из ниш для использования Nb<sub>3</sub>Sn-материалов являются высокопольные магниты, например, СМС ЯМР-спектрометров, требующие из соображений высокого разрешения близких к критическим полей. Здесь следует выразиться более аккуратно: требуется предельное для данной рабочей температуры поле, близкое, но более низкое, чем поле необратимости  $H^*$ , выше которого в материале отсутствует запиннингованная решетка флюксонов и теряет смысл понятие критического тока — материал становится резистивным. У низкотемпературных сверхпроводников  $H^*$  близко ко второму критическому полю. Различие составляет около 10 %, и в этом случае уточнение носит скорее академический характер.

Второй развивающейся областью использования Nb<sub>3</sub>Sn-материалов являются СМС, в которых обмотка находится в сложно-деформированном состоянии и подвергается воздействию мощных электромагнитных импульсов, как в случае тороидальных магнитов основного поля токамаков в момент раз渲ала тока плазмы. При разумном выборе рабочих параметров таких магнитов температурные и полевые запасы Nb<sub>3</sub>Sn-материалов обеспечивают устойчивость СМС. Впервые это было продемонстрировано на СМС отечественных токамаков Т-7 и Т-15.

Нужно признать, что определяющая часть технологий сверхпроводникового магнитостроения — приемы сохранения сверхпроводящего состояния магнитов, а при необходимости — безопасного вывода из них запасенной энергии в результате большого накопленного опыта создания СМС различного назначения и его расчетно-теоретического анализа может считаться

разработанной и освоенной. Эта обширная отрасль заслуживает отдельного рассмотрения. Здесь же уместно ограничиться общим замечанием, что сегодня в области СПС квалифицированные коллективы создают эффективные СМС с предсказуемыми параметрами.

Существенное влияние на развитие СПС гелиевого уровня температур оказывает сопутствующее развитие самой гелиевой техники. Заслуживают быть отмеченными три обстоятельства. Первое — сегодня крупные и средние системы (эквивалентные по холодопроизводительности  $\geq 100$  л жидкого Не в час) имеют затраты на производство 1 Вт гелиевого холода 300 Вт на уровне комнатных температур и возросшую продолжительность безостановочной работы. Во-вторых, разработаны и эксплуатируются крупномасштабные системы криостатирования СМС сверхтекучим гелием, преимущественно с рабочей температурой 1,9 К. Это позволяет при использовании Nb-Ti-материалов поднять критическую плотность тока в обмотке и более надежно работать в полях, близких к критическим. И, наконец, третье обстоятельство, существенное для СПС: создание микрохладителей с холодопроизводительностью на гелиевом уровне, как правило, до 10 Вт и с надежностью порядка 10 тыс ч и более непрерывной работы. И хотя эффективность этих криогенных устройств раз в пять ниже, чем для более мощных стационарных установок, они дают принципиально новое качество СМС — автономность. Это качество используется во многих тысячах СМС МР-томографов, где микрохладители служат для компенсации теплопритоков в зону гелиевых температур, которые составляют единицы ватт, или для создания СМС, свободных от жидкого гелия. Совершенствование криогенной техники в последние годы открывает путь проникновению НТСП-технологии в общепромышленные области, такие как сверхтонкая сепарация каолина, очистка его от окисей Fe и Ti, или устройства на базе сверхпроводниковых индуктивных накопителей с запасенной энергией масштаба 10 МДж и мощностью до сотен кВт для систем бесперебойного питания ответственных потребителей, в том числе и удаленных.

Подводя итог краткого рассмотрения современного положения СПС гелиевого уровня температур, достигшей выдающихся результатов в создании уникальных электрофизических установок, осуществившей коммерческий прорыв в область медицинской диагностики и делающей первые шаги в общепромышленную технику, можно сказать, что она является, практически, отраслью современной промышленности с годовым оборотом более 2 млрд долл. в год. Возможности совершенствования низкотемпературных сверхпроводящих материалов и их технологий в значительной степени исчерпаны. Прогресса в области СПС следует ожидать от перехода к новым сверхпроводникам, расширяющим температурные и полевые рамки работоспособности СМС [3].

### 3. СПС азотного уровня температур

Одно из выдающихся открытий в физике конца XX столетия — открытие ВТСП — предоставило возможности радикального изменения положения СПС. После обнаружения Дж. Беднорцем и А. Мюллером в 1986 г. сверхпроводимости в слоистом купрате  $\text{LaBa}_2\text{CuO}_4$  с  $T_K$ , заметно превышающей  $T_K$  всех известных к этому времени сверхпроводников, и осуществленных буквально в течение двух последующих лет синтезов

новых купратных сверхпроводников,  $T_K$  которых перешагнули отметку 77,3 К, отвечающую температуре кипения жидкого азота при нормальном давлении, а затем и отметку 100 К, в СПС открылся путь к изменению двух основных составляющих любого СП-устройства, а именно, собственно сверхпроводника и криогенной системы. С точки зрения практического применения СПС наиболее важными фактами являются повышение рабочих температур и возможность замены жидкого гелия, дорогого и невозобновляемого хладагента, новым хладагентом — жидким азотом, что в совокупности ведет к значительному упрощению системы криостатирования СП-устройства. Тогда эксплуатационные расходы на криостатирование становятся в тысячу раз меньше, чем для криостатирования на гелиевом уровне температур. Это связано с тем, что стоимость 1 л жидкого  $\text{N}_2$  в среднем в 70 раз ниже стоимости 1 л жидкого Не, а скрытая теплота испарения жидкого азота в 60 раз выше. Кроме того при работе на азотном уровне температур СП-устройства по фундаментальным причинам, связанным с более высокой, чем гелиевая, рабочей температурой, становятся существенно устойчивее к разнообразным механомагнитотермическим возмущениям. В случае возникновения области обмотки, перешедшей из сверхпроводящего в нормальное состояние, так называемого возникновения нормальной фазы, скорость роста ее объема в сотни раз ниже, чем в НТСП-устройствах. Поэтому методы защиты, разработанные для СМС гелиевого уровня температур, являются абсолютно достаточными для ВТСП-устройств. Важным положительным фактором, позволяющим упростить конструкцию изоляции, особенно высоковольтной, является высокая диэлектрическая прочность жидкого азота, в этом отношении близкого к трансформаторному маслу.

Очевидная красота, обманчивая простота и загадочность самого явления ВТСП, наряду с отмеченными выше потенциальными возможностями его практического использования послужили основой довольно длительной эйфории среди научно-технической общественности и средств массовой информации относительно темпов развития в этой области исследований и разработок. Несмотря на беспрецедентный объем работ по ВТСП, выполненных за 16 лет, прошедших со времени ее открытия, мы не имеем достаточно совершенной и общепризнанной теории этого явления. А в практическом использовании ВТСП делаем лишь первые революционные шаги [3].

Из более чем сотни синтезированных на сегодня ВТСП-соединений по совокупности своих свойств, их физико-химической и технологической исследованности на роль технических сильноточных ВТСП-материалов претендуют два соединения:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  со структурой орторомбического слоистого перовскита с  $T_K = 94$  К,  $H_{K2}(0) > 100$  Тл,  $\xi(0) = 1,5$  нм,  $\lambda(0) = 150$  нм и  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  со структурой тетрагонального слоистого перовскита с  $T_K = 110$  К,  $H_{K2}(0) > 100$  Тл,  $\xi(0) \approx 1,5$  нм,  $\lambda(0) \approx 150$  нм (величины верхнего критического поля, длины когерентности и глубины проникновения поля приведены для базисной плоскости  $ab$  для обоих соединений). Кратко эти соединения обозначаются соответственно YBCO-123 и Bi-2223. Они характеризуются очень высокой структурной анизотропией и, соответственно, анизотропией физических свойств.

Достаточно сказать, что отношение значений  $H_{\text{K2}}(T)$  при ориентации поля перпендикулярно и вдоль оси  $c$ ,  $H_{\text{K2}}^{\perp}/H_{\text{K2}}^{\parallel}$ , составляет для YBCO около 7, а для Bi-2223 около 100. Аналогичной анизотропией характеризуется и поле необратимости, определяющее допустимый диапазон рабочих магнитных полей. Но самое главное, в рассматриваемых материалах значения полей необратимости при температуре жидкого азота  $H^*(77)$  для полей параллельных оси  $c$ , оказываются обескураживающими низкими: для Bi-2223 это поле порядка 0,3 Тл при значениях  $H_{\text{K2}}(77) \sim 50$  Тл, а для YBCO оно заметно выше и равно  $\sim 7$  Тл при  $H_{\text{K2}}(77) \sim 30$  Тл. Из-за высокой анизотропии ВТСП-материалов, представляющих собой практически стопки слабосвязанных сверхпроводящих и нормальных слоев с толщиной слоев, сравнимой с величиной  $\xi(0)$ , традиционные представления о решетке вихрей и возможных оценках сил пиннинга оказываются в этом случае неприемлемыми [4]. До сих пор не сформулированы адекватные взгляды на природу важнейших центров пиннинга, посему оптимизация токонесущей способности технических ВТСП-материалов осуществляется преимущественно эмпирическим методом.

Казалось, что по совокупности свойств и, в первую очередь, из-за меньшей анизотропии и более высокого поля необратимости при 77 К, сначала будет создана технология технических сильноточных ВТСП-материалов на основе YBCO. Так оно и начиналось. Однако сложности создания обмоточных материалов из керамики оказались значительно превосходящими ожидания и неизмеримо более существенными по сравнению со сложностью материалов гелиевого уровня температур. В результате возникла неожиданная ситуация: технология первого поколения сильноточных ВТСП-материалов была создана для соединения Bi-2223 и его аналога с более низкими параметрами при 77 К — соединения Bi-2212. Использованный технологический прием внешне выглядит очень просто. Он называется технологией "порошок в трубе" (PIT-технология) и представляет собой совокупность процессов прессования, протяжки, обжатия при различных температурах и временных выдержках заготовки в виде трубы из сплава на основе серебра, заполненной порошком так называемого прекурсора — вещества или веществ, превращающихся в процессе обработки в сверхпроводящее соединение Bi-2223. При этом технология приходится совмещать во имя максимальной токонесущей способности технического изделия целый ряд взаимопротиворечящих решений. В качестве материала трубы можно использовать чистое серебро или сплавы на его основе, которые обладают инертностью по отношению к керамике, обеспечивают диффузию кислорода для поддержания необходимой стехиометрии и способствуют направленному росту сверхпроводящей фазы. Собственно микрокристаллы сверхпроводника должны быть максимально текстурированы: угол между границами зерен не должен превышать 3–5°, в противном случае будет происходить экспоненциальное падение токонесущей способности с увеличением угла разориентировки; сечение изделия (единичного провода) из первоначальной заготовки должно быть максимально плотно заполнено текстурированным сверхпроводником. Однако при механической деформации в хрупком материале сверхпроводника возникают трещины и пустоты, катастрофически сни-

жающие токонесущую способность. Следовательно, в технологическом процессе должны быть предусмотрены процессы подплавления сверхпроводника для залечивания трещин. Есть и другие тонкости процесса: гранулометрический состав порошка, исключение некоторых примесей и т.п. Из полученных круглых одножильных проводов собирается скрученный (твистированный) жгут. Он упаковывается в трубку из Ag и подвергается новой процедуре термомеханических обработок, а на конечной стадии подвергается операции плющения и компактирования. В результате получается токонесущий элемент (многожильный твистированный провод) в виде ленточки с характерными размерами 3–4 мм на 0,2–0,3 мм с заполнением по сверхпроводнику от 20 до 40 %, рабочим током на ленточку от 20 до 100 А в магнитном поле собственного тока при 77,3 К. Токонесущие элементы с более высоким рабочим током получаются из единичных лент путем создания кабельных изделий. В настоящее время единичная длина ленты достигает величины до 1000–1500 м. Большим достоинством технологии "порошок в трубе" является возможность ее промышленного масштабирования. Опытно-промышленное производство технического сильноточного материала Bi-2223 организовано в ряде стран мира, в том числе и в России. На рисунке 3 приведена зависимость критической плотности тока от поля и его ориентации по отношению к плоскости ленты, а в табл. 1 — достигнутые и ожидаемые свойства этого материала по оценкам европейской группы экспертов [5]. Следует особо отметить, что для обеспечения безусловной конкурентности ВТСП-изделий общепромышленного назначения требуется, чтобы стоимость провода не превышала 20 долл. за 1 кА м. В США эту задачу намерены решить за счет строительства специализированного завода с годовой производительностью 10000 км ленты в год, и при таком масштабе производства уже к 2004 г. планируется не только снизить стоимость 1 кА м проводника Bi-2223, но и существенно улучшить совокупность его эксплуатационных свойств. До последнего времени объемы производства различных фирм-про-

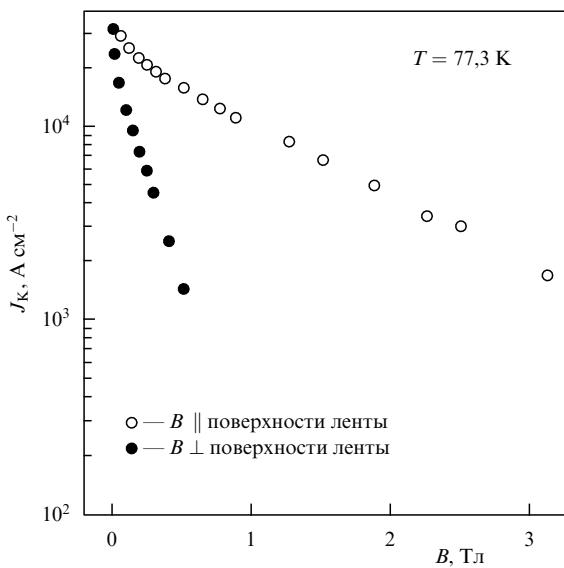


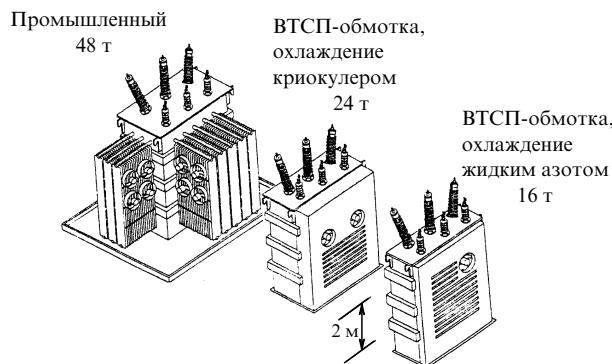
Рис. 3. Анизотропия полевой зависимости  $J_K$  от индукции магнитного поля для лент Bi-2223/Ag при 77 К.

**Таблица 1.** Современное состояние и перспективы ленточных сверхпроводников Bi-2223/Ag (по материалам Европейской группы экспертов)

Параметры	2000 г.	2003 г.
Ширина, мм	2,5–4,5	1–10
Толщина, мм	0,15–0,3	0,15–1
Длина, км	1–1,5	2
Заполнение сверхпроводником, %	23–35	40–50
Разброс критических параметров от партии к партии, %	6	2
Типовое значение $J_K$ при 77 К в поле собственного тока, $\text{kA cm}^{-2}$	25	50
Инженерная плотность тока $J_K$ (77 К, собственное поле), $\text{kA cm}^{-2}$	7	25
Типовое значение тока $I_K$ (77 К, собственное поле), А	50	150
Цена 1 кА м проводника при 77 К в собственном поле, Евро	300	< 100
Критическая деформация, %	0,4–0,5	0,4–0,5
Критическое напряжение, МПа	120	250
Критическая температура, К	110	110
Теплопроводность провода в серебре при 50 К, $\text{Вт m}^{-1} \text{K}^{-1}$	500	500
Теплопроводность провода в сплаве серебра, $\text{Вт m}^{-1} \text{K}^{-1}$	50	50
Потери на переменном токе при 77 К, 50 Гц и поле 0,1 Тл (паралл.), $\text{mWt A}^{-1} \text{m}^{-1}$	0,3–0,4	0,1–0,25
Сопротивление спая, Ом $\text{cm}^2$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$
Межвитковое напряжение пробоя изоляции (толщина 10 мкм), В	300	500

изводителей не превышали сотен километров ленты в год.

Но несмотря на относительно скромные масштабы производства Bi-2223-сверхпроводников и более чем скромные их эксплуатационные характеристики при 77,3 К — рабочее поле, перпендикулярное плоскости ленты, не более 0,3 Тл, а плотность критического тока около  $(2–4) \times 10^8 \text{ A m}^{-2}$ , это первое поколение технических сильноточных ВТСП-материалов позволило сделать принципиально важный прорыв в использовании СПС в общепромышленной, в первую очередь, электроэнергетической технике [6, 7]. После разработки модельных вариантов сверхпроводниковых кабелей были изготовлены и поставлены в эксплуатацию в реальные энергосистемы полномасштабные участки СЛЭП — сверхпроводниковых линий электропередачи (табл. 2). Разработаны и прошли испытания в условиях реальных энергосистем ВТСП-трансформаторы мощностью



**Рис. 4.** Сравнение габаритов трансформаторов на 30 МВ А.

порядка 1 МВ А (табл. 3 и рис. 4). Здесь интересно отметить, что в таком классическом и совершенном электротехническом устройстве, каким является трансформатор, использование сверхпроводимости не только повышает КПД и в 2–3 раза уменьшает массогабаритные показатели, но и делает их пожаробезопасными и экологически безвредными. Образцами одних из первых электротехнических устройств, использующих ВТСП-материалы, были сверхпроводниковые ограничители тока (СОТ) с нелинейной вольтамперной характеристикой, обеспечивающие практически мгновенное срабатывание и, следовательно, повышение надежности и качества обеспечения электроэнергией в существующих системах ее передачи и распределения. Свойства наличных ВТСП-проводов предопределяют неизбежность их работы при 77 К в режиме подмагничивания. Тем не менее создано заметное многообразие СОТ с железным сердечником (рис. 5), и они также начали использоваться в энергосистемах. Уместно здесь будет отметить, что в одном из безжелезных СОТ используется ВТСП-катушка диаметром 1 м и высотой 0,75 м, в которой при  $T = 40 \text{ K}$  в момент срабатывания генерируется магнитное поле 1,4 Тл. Можно продолжать перечисление разнообразных электротехнических устройств, успешно использующих ВТСП-проводники. Интересно, что их роль оказывается существенной и в работе НТСП-устройств, где использование токовводов из ВТСП заметно облегчает условия работы гелиевых криогенных систем за счет снижения на порядок теплопритока по токовводам. Использование дополнительных обмоток из технического ВТСП-материала на основе соединения Bi-2212

**Таблица 2.** Характеристики трехфазных эксплуатируемых СЛЭП (сверхпроводящий материал Bi-2223/Ag)

Параметр	Карролтон (Джорджия), США*	Копенгаген, Дания	Детройт, США
Время ввода в строй	1998 г.	Май 2001 г.	Июнь 2001 г.
Длина, м	33	30	120
Напряжение, кВ	12,5	30	24
Ток, кА	1,25	3	2,4
Рабочая температура, К	77	77	77
Изоляция	"Холодный диэлектрик"	"Теплый диэлектрик"	"Теплый диэлектрик"
Диаметр, см	10	10	10
Тип кабеля	жесткий	гибкий	гибкий
Потери** при рабочей температуре, $\text{Вт m}^{-1}$	$\sim 1$	$\sim 1$	$\sim 1$
Обеспечиваемое количество потребителей	Эквивалент снабжения 18 тыс потребителей	150 тыс потребителей	30 тыс потребителей

\* Внутрикорпоративная энергосистема Southwire Co.

\*\* Приведенные к комнатной температуре потери в СЛЭП в 10–15 раз меньше, чем в обычном кабеле.

Таблица 3. Параметры испытанного и проектируемого трансформаторов

Параметр	Однофазная модель	Проектируемый образец
Мощность, МВт	0,8	20
Отношение напряжений, кВ	6,6/3,3	66/6,9
Отношение токов, А	121/242	175/969
Рабочая температура, К	66	66
Частота, Гц	60	60
Магнитная индукция (комнатная температура), Тл	1,6	1,6
Полное сопротивление, %	0,67	7,5
Сверхпроводник	Bi-2223/Ag	Bi-2223/Ag (сплав)
Охлаждение	Переохлажденный жидкий азот	Переохлажденный жидкий азот
Испытательные напряжения, кВ	—	140/350
Потери в меди*, кВт	3,54	10,8
Потери в стали*, кВт	5,83	12,3
КПД, %	99,4	99,9

\* Потери, приведенные к комнатной температуре.

при гелиевых температурах, где этот материал имеет более высокую плотность тока и более высокое критическое поле, чем Nb<sub>3</sub>Sn, позволяет повышать достижимые значения поля чисто сверхпроводящих магнитов, необходимых, например, для ЯМР-спектрометрии.

Совершенно очевидно, что увеличение объемов производства Bi-2223-материалов, расширение областей их использования и дальнейшее совершенствование технологии значительно улучшит эксплуатационные, и стоимостные показатели этого представителя первого поколения технических ВТСП-проводов. Однако это не очень приближает к реализации заветной мечты — созданию СПС на основе ВТСП, что при температуре

жидкого азота и по значениям критических плотностей тока ( $10^{10}$ – $10^{11}$ ) А м<sup>-2</sup>, и по диапазону рабочих полей от 0,2 до 10 Тл открыло бы широкую дорогу для действительно радикального технического перевооружения всех электропроизводящих и электропотребляющих областей промышленности и техники за счет использования сверхпроводникового оборудования как наиболее эффективного, экономичного и дружественного по отношению к окружающей среде.

Решение такой задачи требует создания нового поколения технических ВТСП-материалов с более высокими эксплуатационными параметрами и стоимостью не выше стоимости традиционных сверхпроводников (~ 10 долл. за 1 кА м). Первым кандидатом на эту роль было соединение YBCO, для которого еще на самой ранней стадии работ по ВТСП на структурно близких подложках методом лазерной абляции были получены эпитаксиальные слои толщиной порядка нескольких мкм с критической плотностью тока до  $10^{11}$  А м<sup>-2</sup> при 77,3 К в поле собственного тока. С учетом относительно высокого значения поля необратимости 7 Тл при азотной температуре это принципиально позволяло решать основные проблемы СПС азотного уровня. Однако свойства YBCO — близость к переходу металл–диэлектрик, d-волновая природа спаривания, малая длина когерентности, осложненные химической неоднородностью, налагают на методы изготовления токонесущих элементов жесткие ограничения, прежде всего, требование близкой к идеальной текстурированности слоев сверхпроводника. Поэтому в основе всех современных подходов к созданию YBCO-проводов лежит обеспечение эпитаксиальности слоя сверхпроводника. Но, несмотря на высокую критическую плотность тока, достигаемую в эпитаксиальном слое, средняя плотность тока оказывается довольно низкой, так как конструкция сверхпроводящего провода многокомпонентна и сложна.

В одном из наиболее перспективных технологических подходов, получивших название RABITS (rolling assisted biaxially textured substrate), на текстурированную в результате прокатки ленту из Ni или его сплава наносится буферный слой окислов CeO<sub>2</sub>, стабилизированная иттрием окись Zr и снова CeO<sub>2</sub>, а затем уже слой YBCO толщиной масштаба мкм, слой серебра или его сплава и, наконец, слой изоляции. Предлагаются различные вариации этого метода. Но все это поиски лабораторного

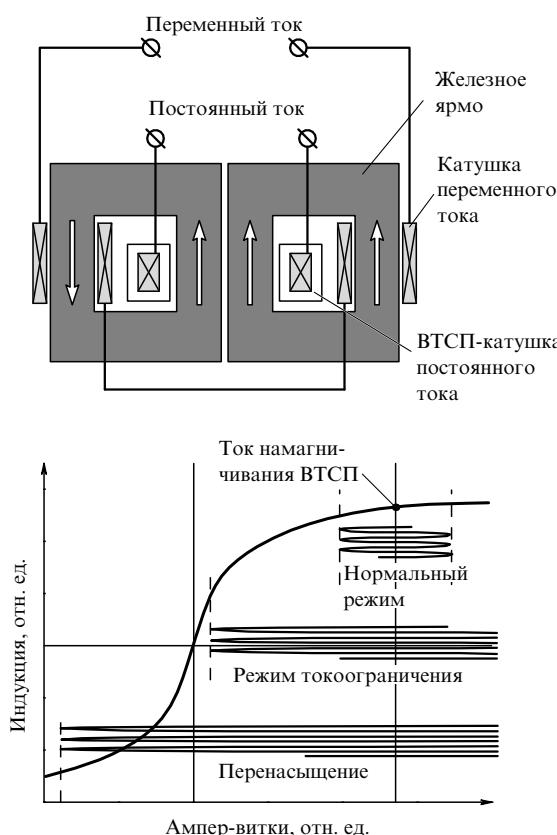


Рис. 5. Схема и принцип действия сверхпроводникового ограничителя тока (СОТ) с насыщенным ярмом.

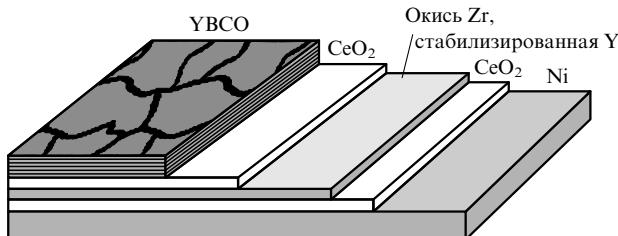


Рис. 6. Схема ВТСП-проводника 2-го поколения.

масштаба, далекие пока еще от опытно-промышленной, а тем более, промышленной технологии ВТСП-изделий второго поколения (рис. 6). На эту роль могли бы претендовать и другие ВТСП-соединения, например, ртутные купраты с высокими значениями полей необратимости и плотностей критического тока. Но они по сравнению с YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> находятся на еще более ранней стадии освоения [8].

Открытый в начале 2001 г. металлический сверхпроводник MgB<sub>2</sub> с гексагональной структурой из перемежающихся слоев — графитоподобных плоскостей бора и гексагональных плотноупакованных плоскостей Mg, имеет критическую температуру  $\sim 39$  К, верхнее критическое поле около 39 Тл в направлении, перпендикулярном оси *c*, и поле необратимости при  $T = 0$  около 35 Тл, критическая плотность тока при  $T = 4,2$  К и поле 4 Тл масштаба  $10^{10}$  А м<sup>-2</sup>. Конечно, пока еще не существует технологий проводов на основе MgB<sub>2</sub>. Но из совокупности свойств следует ожидать, что в технологическом отношении MgB<sub>2</sub> будет не столь капризен, как купрат-

ные сверхпроводники. Его вхождение в практику не снимет проблему ВТСП-материалов, но может заметно расширить температурный и полевой диапазон работы металлических сверхпроводников. Это произойдет примерно через 5 лет, не ранее [9]. Такие общие соображения можно высказать о сценарии развития ситуации с ВТСП-материалами второго поколения, если не произойдет какого-либо непредсказуемого открытия, на которые богата история сверхпроводимости последних лет.

И все же, говоря в целом о современном состоянии сильноточной сверхпроводниковой технологии, следует признать, что произошедший в последние годы прогресс преобразовал СПС из технологии уникальных электрофизических установок в технологию, даже на начальном этапе, достаточно широкого общепромышленного использования. И сверхпроводимость в XXI веке сыграет не меньшую роль, чем полупроводниковые материалы во второй половине XX века.

### Список литературы

1. Черноплеков Н А *Вестник АН СССР* (9) 48 (1978); (11) 7 (1987)
2. Chernoplekov N A *IEEE Trans. Magn.* **28** (1) 121 (1992)
3. Черноплеков Н А *Вестник РАН* **71** 303 (2001)
4. Blatter G et al. *Rev. Mod. Phys.* **66** 1125 (1994)
5. Vane P et al. *Supercond. Sci. Technol.* **13** R71 (2000)
6. Superconductivity for Electric Systems. Program Plan 1996–2000, US Department of Energy
7. Черноплеков Н А и др., в сб. *Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: VI симп. "Электротехника 2001"*, Москва, 2001 Труды. Т. 1 (М.: Изд-во ВЭИ, 2001) с. 34
8. Larbalestier D et al. *Nature* **414** 368 (2001)
9. Buzza C, Yamashita T *Supercond. Sci. Technol.* **14** R115 (2001)