

Шевченко В.В., Омельченко Л.Н., Заныхайло Е.А.  
*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков*

## **Анализ особенностей работы материалов при криогенных температурах и выбор материалов для энергетических установок ТЭС и АЭС**

*На основании подробного анализа физики низко- и высокотемпературной сверхпроводимости, современного состояния развития технологии изготовления высокотемпературных сверхпроводников, дан краткий обзор особенностей их практического применения в наиболее энергоемких элементах электрооборудования, в частности, в электрических машинах, в энергоустановках тепловых электрических станций классического исполнения и АЭС.*

***Энергосбережение, сверхпроводимость, энергетика, электрические машины, электрические станции***

### **Введение**

**Постановка проблемы.** Энергосбережение в настоящее время является общемировой задачей. В Украине износ электрооборудования тепловых электростанций и промышленных предприятий оценивается в (70 ÷ 100) %, т.е. требуется немедленное решение проблемы по модернизации, а лучше по замене этого оборудования. Проведение капитальных ремонтов энергетического оборудования - практически единственный путь поддержания в рабочем состоянии практически полностью изношенного оборудования современных ТЭС и АЭС. Но если уже выделяются средства на реконструкцию, модернизацию, замену оборудования электростанций, то принимать решение следует с учетом будущего рассматриваемой станции и энергетики в целом, следует учитывать возможности новых материалов и технологий. Поэтому следует вести работы по рассмотрению перспективных направлений возможного развития электроэнергетики, которое будет включать решение проблем энергосбережения с учетом перспектив развития и внедрения нового оборудования и современных технологий. Крупные ТЭС и АЭС являются базовыми для энергетики Украины, но одновременно следует рассматривать и возможности малой энергетики, т.е. энергетики, которая опирается на современные мировые принципы децентрализации энергоснабжения. Повышается роль топливных элементов, работающих на водороде, газовых комбинированных турбин и мини-турбин, нетрадиционных источников энергии (ветер, солнце, энергия гейзеров и подземных вод, приливов и морских течений...). Одним из наиболее перспективных направлений можно считать применение сверхпроводников (СП-в) в энергетических системах, в отдельных типах оборудования, комплексах и технологических линиях, [1,2]. Особенно перспективно это стало после появления нового класса высокотемпературных сверхпроводников. Использование явления СП-сти является реальным направлением повышения экономической эффективности и экологической безопасности электроэнергетических установок, снижения массогабаритных показателей и повышения надежности. В настоящее время существует два класса сверхпроводящих материалов, которые используют в качестве токонесущих элементов: низкотемпературные (НТСП) и высокотемпературные сверхпроводники, (ВТСП).

**Анализ публикаций.** Материалы статьи базируются на данных публикаций о теории СП-сти, на данных о современных технологиях изготовления НТСП и ВТСП, технических областях их использования, а также об особенностях работы проводников, изоляционных и конструкционных материалов при глубоком охлаждении, [3-5].

**Цель статьи** - оценить современное состояние и перспективы применения в электроэнергетических устройствах глубокого охлаждения, определить основные перспективы и области использования СП-го оборудования, провести анализ существующих электротехнических изделий с точки зрения особенностей работы конструкционных, проводниковых и изоляционных материалов при низких температурах на примере элементов энергетических систем ТЭС и АЭС.

### **Основной материал**

Ни одна из современных технологий получения энергии не имеет перспектив на отдаленное будущее и может решать только временные, сегодняшние проблемы. Кризисное состояние энергетики следует отнести к серьезным недоработкам современных технологий получения, распределения и потребления энергии, к недостаточному финансированию энергокомплекса страны. Есть различные предложения по выходу из эколого - энергетического тупика, но каждый из них имеет много недоработок и на сегодняшний день бесперспективен. Проблемой является то, что срок получения практических результатов неизвестен, а электроэнергия нужна сейчас. Нужны новые научные исследования по поиску принципиально новых источников и способов получения электроэнергии: необходимо продление срока эксплуатации действующего оборудования за счет его модернизации, проведение реконструкции с внедрением новых технологий; повышение эффективности энергоустановок классических тепловых, атомных и гидроэлектростанций; внедрение нового энергооборудования с высокими энергетическими характеристиками: КПД, коэффициентом мощности, линейными нагрузками, индукцией, плотностью тока и т.д. Но наиболее перспективен поиск новых решений в получении электроэнергии.

Рассмотрим исследования криогенного и сверхпроводящего электрооборудования.

Массовое использование в энергетике СП-ших материалов ограничивается высокой стоимостью и необходимостью охлаждения до сверхнизких температур. Но в настоящее время наблюдается вторая волна активизации использования СП-ов в электротехнических установках, [1,2].

Предыдущий этап активных исследований СП-сти и попыток ее практического использования следует отнести к концу 60-х, к 70-м годам 20 века. К этому периоду относятся и первые образцы электротехнического оборудования сильно- и слаботочного диапазона с использованием СП-ов (например, обмотки электрических машин и аппаратов, соленоиды, кабели ...). Исследованиями природы СП-в, созданием теории СП-сти занимались давно. Были получены определенные результаты: долгие годы официальный статус в определении физики СП-сти имела теория БКШ (Бардина - Купера - Шриффера, 1957 г., США, Нобелевская премия 1972 г.), которая являлась практически первой завершенной научной теорией, объяснявшей явление СП-ти. Согласно этой теории электроны, при определенных энергетических состояниях всей атомарной структуры материала, притягиваются друг к другу, образуют связанные (куперовские) пары, которые перемещаются в кристаллической решетке, не встречая сопротивления.

Следует отметить, что притяжение относится лишь к той части электронов, которые ответственны за электропроводность, то есть свободным электронам. Оказалось также, что не всякие два электрона способны притягиваться. Одним из основных элементов модели Купера было утверждение, что пару могут создавать только те электроны, у которых импульсы равны по величине и противоположны по направлению, то есть те, у которых полный импульс пары равен нулю.

Не следует также думать, что спаренные электроны образуют единое целое. Размер пары относительно большой – порядка  $10^{-6}$  м. В этом объеме размещается огромное число связанных пар, так что понятие изолированной пары теряет смысл. При очень низких температурах это координированное состояние электронов осуществляется самопроизвольно, потому что выигрыш в энергии превышает потери (потери связаны с тем, что свободные электроны могут утрачивать свою свободу). Вот почему СП-е состояние устойчиво и для его разрушения необходимо приложить немалую энергию (тепловую, магнитную, электрическую).

Пространственное перекрытие огромного числа пар приводит к строгой взаимной согласованности, корреляции их движения. Пары не могут двигаться независимо друг от друга, как электроны в нормальном металле. В отсутствие внешнего поля все пары вследствие полной корреляции имеют импульс равный нулю и, если поместить куперовские пары в электрическое поле, то пары будут ускоряться, то есть получать импульс. Но и этот импульс для всех пар должен быть одинаковым.

Возникновение тока не нарушает корреляцию пар: они движется в одном направлении, с одной скоростью. Но при этом поведение пар отличается от поведения обычных электронов. В обычном состоянии электроны оседают на положительно заряженных атомах, теряют энергию при столкновениях, что и обуславливает наличие сопротивления. Куперовские пары, пока они не разорваны, рассеиваться на решетке не могут. Например, “отскакивание” одного из членов пары в сторону при столкновении с атомом компенсируется действием его “партнера”, то есть суммарный импульс остается неизменным. Не рассеиваясь на решетке, спаренные электроны могут двигаться сквозь решетку кристалла без всякого сопротивления.

Согласно теории БКШ, в 1 см<sup>3</sup> вещества формируется примерно  $10^{20}$  таких куперовских пар. Теория БКШ также объясняет, почему хорошие проводники, такие, как медь и золото, не являются СП-ками: электроны проводимости в этих веществах легко проходят сквозь атомную решетку, почти не взаимодействуя с ней. Это делает такие материалы хорошими электрическими проводниками, поскольку в них теряется мало энергии из-за рассеяния решеткой, но для достижения СП-шего состояния как раз необходимо сильное взаимодействие между атомами решетки и электронами. Поэтому хорошие классические проводники, как правило, не бывают СП-ками. На разрыв куперовских пар требуется затратить энергию, но энергия связанных электронов немного меньше энергии электронов в обычном, резистивном состоянии. Это фотонный механизм образования куперовских пар, в котором предполагалось существование энергетической щели, определяющей возможность существования СП-ящего состояния для конкретного материала.

Распределение электронов в нормальном металле описывается функцией Ферми-Дирака. Она определяет среднее число ферми-частиц, находящихся в квантовом состоянии с энергией  $E$ .

$$F(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/(kT)} + 1}$$

где  $k = 1,381 \times 10^{-22}$  м<sup>2</sup> кг с<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup> - постоянная Больцмана;

$T$  – температура, К

$\mu$  - химический потенциал. Химический потенциал для ферми-частиц может быть только положительным, т.е.  $\mu > 0$ ; он имеет размерность энергии, в случае ферми-частиц называют энергией Ферми или уровнем Ферми и обозначают  $E_F$ .

В физике, энергия Ферми ( $E_F$ ) системы невзаимодействующих фермионов — это увеличение энергии основного состояния системы при добавлении одной частицы. Это эквивалентно химическому потенциалу системы в ее основном состоянии при абсолютном нуле температур. Это может также интерпретироваться, как максимальная энергия фермиона в основном состоянии. Химический потенциал приблизительно равен энергии Ферми при температурах намного меньше характерной температуры Ферми  $E_F/k$ . Характерная температура имеет

порядок  $10^5\text{K}$  для металла, и, следовательно, при комнатной температуре (300 K), энергия Ферми и химический потенциал фактически эквивалентны.

В идеальном Ферми-газе в пределе низких температур  $\mu = E_F$ . В этом случае функция распределения частиц определяется функцией Ферми:

$$F(E) = \frac{1}{e^{(\varepsilon_i - E_F)/(kT)} + 1}$$

где  $\varepsilon_i$  – энергия электрона  $i$ -го уровня

Для свободных нерелятивистских фермионов энергия Ферми обратно пропорциональна массе и пропорциональна плотности в степени  $2/3$ . Нуклоны в ядре вряд ли можно считать свободными, но все-таки, ядерная материя очень плотная, поэтому и энергия Ферми большая.

$$E_F = \frac{(2m)^2}{2m} [3n/4\pi(2s+1)]^{2/3}$$

где  $s$  – спин частицы;  $n$  – число частиц

В статистике Ферми — Дирака среднее число частиц в состоянии с энергией  $\varepsilon_i$  есть

$$n_i = \frac{g_i}{e^{(\varepsilon_i - \mu)/kT} + 1}$$

где  $n_i$  – среднее число частиц в состоянии  $i$ ,

$\varepsilon_i$  – энергия состояния  $i$ ,

$g_i$  – кратность вырождения состояния  $i$  (число состояний с энергией  $\varepsilon_i$ ),

Обозначим  $\bar{u}(\varepsilon)$  – вероятность того, что для фиксированной температуры состояние с энергией  $E$  будет занято фермионом. Распределение Ферми - Дирака  $\bar{u}$  является убывающей функцией от  $E$ . Это соответствует тому, что высокоэнергетические состояния заполняются с меньшей вероятностью. На рис. 1 представлено распределение Ферми - Дирака как функция от  $\varepsilon/\mu$ , построенная для 4 различных температур. Очевидно, что заполнение уровней с энергиями  $E > \mu$  растёт с увеличением  $T$ . С ростом температуры ступенька размывается. На рис. 2 представлено распределение Ферми - Дирака как функция температуры. Заполнение уровней с энергиями  $\varepsilon > \mu$  растёт с увеличением температуры. Т.е. высокоэнергетические состояния имеют меньшую вероятность или, можно сказать, что низкоэнергетические состояния более вероятны. Наличие состояния, занятого частицей, означает, что система находится в микросостоянии  $S_1$ , вероятность которого

$$\bar{u} = P(S_1) = \frac{e^{-(E(S_1) - \mu N(S_1))/kT}}{Z} = \frac{e^{-(\varepsilon - \mu)/kT}}{e^{-(\varepsilon - \mu)/kT} + 1} = \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu)/kT} + 1}$$

где  $\bar{u}$  – называется распределением Ферми — Дирака.

Поскольку для фермионов  $\mu > 0$ , то  $E_F$  также больше нуля. В дальнейшем будет показано, что энергия Ферми  $E_F$  является медленно меняющейся функцией  $T$ . Для того, чтобы выявить физический смысл энергии Ферми, рассмотрим зависимость распределения Ферми-Дирака от  $T$ . Пусть  $T=0$ . Конечно, утверждение о том, что абсолютный нуль температур не достижим, остается в силе. Говоря о  $T = 0\text{ K}$ , мы будем считать, что рассматриваемая температура  $T$

может быть сколь угодно близка к абсолютному нулю, т.е.  $T \rightarrow 0$ . Обозначим через  $E_F(0)$  значение энергии Ферми при  $T=0\text{ K}$ .

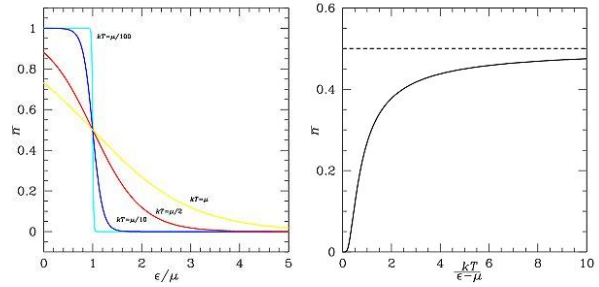


Рис. 1 - Распределение Ферми — Дирака как функция от  $\varepsilon/\mu$ , Ферми — Дирака как построенная для 4 различных функция температуры. Рис. 2. Распределение — Дирака как функция от  $\varepsilon/\mu$ , Ферми — Дирака как построенная для 4 различных функция температуры.

При температуре  $T = 0\text{ K}$  полная функция распределения  $N(E) = f(E) * g(E)$ , определяющая число частиц с энергией  $E$ , равна плотности числа состояний  $g(E)$ , так как  $f(E) = 1$ :

$$g(E) = ((4\pi V) / n^3) * (2m)^{3/2} * E^{1/2}$$

где  $n$  – полное число электронов,

$m = 9,11 * 10^{-31}\text{ кг}$  – масса электрона.

$E$  – энергия, которая отсчитывается от уровня Ферми, т.е. это значение энергии, ниже которой все энергетические состояния частиц вырожденного газа, подчиняющихся статистике Ферми – Дирака, при абсолютном нуле температуры заняты. Существование уровня Ферми – следствие принципа Паули, согласно которому в состоянии с определённым импульсом  $p$  не может находиться более  $(2s + 1)$  частиц. Уровень Ферми совпадает со значениями химического потенциала газа фермионов при  $T = 0\text{ K}$  и его можно выразить через число  $n$  частиц газа в единице объёма и  $m$  – массу частицы.

Величина  $r_F$  называется Ферми - импульсом или граничным импульсом. При  $T = 0\text{ K}$  все состояния с импульсами  $p < r_F$  заняты частицами, а с  $p > r_F$  – свободны. Иными словами, при  $T = 0\text{ K}$  фермионы занимают в импульсном пространстве состояния внутри сферы

$$p^2 = 2mE_F$$

с радиусом  $r_F$  (Ферми-сферы).

При нагревании некоторые частицы переходят из одного состояния в другое состояние с  $p > r_F$ . Внутри Ферми-сферы появляются свободные места, называемые дырками. Взаимодействие электронов в СП-ках с образованием куперовских пар приводит к тому, что небольшая область энергии вблизи уровня Ферми становится запрещенной для «нормальных» электронов - возникает энергетическая щель. В пределах этой щели нет ни одного разрешенного для неспаренных электронов энергетического уровня. Под влиянием взаимодействия между электронами, имеющими энергию, близкую к  $E_F$ , они оказываются как бы сдвинутыми относительно уровня Ферми. При  $T = 0\text{ K}$  ширина щели максимальна ( $2d(T) = 10^{-2} - 10^{-3}\text{ эВ}$ ), а все свободные (неспаренные) электроны находятся под щелью (на уровне с энергией меньше  $E_F$ ). При повышении температуры часть

куперовских пар разрушается, а некоторые неспаренные электроны "перескакивают" щель и заполняют состояния с энергией больше  $E_f$ . Ширина щели  $2d(T)$  при этом уменьшается.

Для неидеального Ферми-газа также существует граничная энергия Ферми, хотя его частицы не находятся в определенных квантовых состояниях. В неидеальном Ферми - газе из электронов в металле при очень низких температурах, вследствие притяжения электронов с равными, но противоположно направленными импульсами и спинами, возможно образование коррелированных пар электронов (куперовских пар) и переход металла в СП-щее состояние. Известно, что СП-щее состояние материала ограничивается областями критических значений температуры ( $T_K$ ) и напряженности магнитного поля ( $H_K$ ).

Низкотемпературные СП-ки (СП-ки гелиевого диапазона охлаждения) условно разделяют на 3 рода:

1) СП-ники 1-го рода - это чистые вещества, у которых наблюдается полный эффект Мейснера, т.е. наблюдается явление идеального диамагнетизма (магнитные поля меньше  $10^5$  А/м): магнитное поле, ранее однородно пронизывающее нормальный металл, при температуре  $T < T_K$ , оказывается вытолкнутым из металла, концентрируясь на его периферии. Связь между этими критическими параметрами для СП-ков 1-го рода может быть с достаточной степенью точности описана:

$$H_K = H_0 * [1 - (T/T_K)]^2,$$

где  $H_0$  – критическое поле проводника при  $T = 0$  К;

$T_K$  – критическая температура сверхпроводника, К.

Эффект Мейснера был важным открытием, поскольку физикам стало ясно, что СП-сть – квантовомеханическое явление. Идеальный диамагнетизм СП-ов заключается в том, что если СП-ник 1-го рода поместить во внешнее магнитное поле, то в поверхностном слое металла возникают экранирующие токи, которые создадут внутри проводника магнитное поле, равное и противоположное внешнему. В 1935 г. братья Лондоны предложили рассматривать СП-сть, как макроскопический квантовый эффект (с расстояниями до  $10^{-6}$  м, а не до  $10^{-10}$  м, как в классической квантовой физике), что позволило для исследования теории СП-сти использовать не классические уравнения электромагнитного поля Дж. Максвелла, а их модификацию. Эти преобразованные уравнения описывали эффект Мейснера, зависимость температуры  $T_K$  от массы атомов кристаллической решетки (изотопический эффект), собственно СП-ть, и ограничения по глубине проникновения поля. Открытие изотопического эффекта указало на то, что СП-ть, вероятно, вызывается особым типом взаимодействия между электронами проводимости и атомами кристаллических решеток, [2].

2) СП-ки 2-го рода - это вещества, в которых эффект Мейснера проявляется частично (поля больше, чем  $10^7 - 10^8$  А/м), т.е. в них внешнее магнитное поле может входить частично и распределяется в виде отдельных нитей, но при этом их активное сопротивление равно нулю, как и у СП-ков 1-го рода. К СП-кам

2-го рода относятся в основном сплавы (из чистых металлов только ниобий, ванадий и технеций). СП-ки 2-го рода могут находиться в одном из трех состояний - в СП-щем, смешанном или нормальном.

Это сплавы и соединения металлов, в частности, с медью и неметаллами. Термин «СП-ки 2-го рода» введен в 1952 г. советским ученым А.А. Абрикосовым, развившим теорию СП-сти Гинзбурга – Ландау. Термин оказался необходим для определения СП-ов с отрицательной поверхностной энергией, в отличие от СП-ов 1-го рода, у которых поверхностная энергия на границе сверхпроводящей и нормальной фаз положительна. Отрицательная поверхностная энергия может быть, если так называемый параметр Гинзбурга – Ландау больше  $1/\sqrt{2}$ . Такие СП-ки сохраняют СП-сть даже в очень сильных магнитных полях, характеризуются большой глубиной проникновения (около  $2 \cdot 10^{-7}$  м) и малой длиной когерентности ( $5 \cdot 10^{-9}$  м). В присутствии слабого магнитного поля (меньше  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл) весь магнитный поток выталкивается из СП-ка 2-го рода. Но выше  $H_{C1}$ , первого критического поля, магнитный поток проникает в образец, хотя и в меньшей степени, чем в нормальном состоянии. Это частичное проникновение сохраняется до второго критического поля –  $H_{C2}$ , которое может превышать 10 Тл. При полях, больших  $H_{C2}$ , поток проникает полностью и вещество становится нормальным. Свойства СП-ов 2-го рода не объяснялись теорией БКШ

3) Сверхпроводники 3-го рода - это "жесткие" СП-ки в основном сплавы и химические соединения СП-ков 2-го рода, содержащие дефекты структуры, служащие местами закрепления вихрей (центров пиннинга). Вихрь - это область СП-ка, в которую проникает внешнее магнитное поле. Каждый вихрь - это элементарный квант магнитного потока. Вихри образуют симметричную решетку, которая при жестком закреплении обеспечивает у СП-ков 3-го рода возможность получения больших критических токов, СП-щие вихри окружают сердцевинки с нормальной проводимостью. Например, в проводнике из  $Nb_3Sn$  в полях с  $B = 10$  Тл плотность тока может быть более  $10^9$  А/м<sup>2</sup>.

В замкнутом контуре ток появляется только в том случае, когда электромагнитное поле изменяется во времени. При эффекте Мейснера это поле постоянно во времени. В соответствии с известными физическими представлениями, казалось бы, нет никаких причин для появления токов, создающих собственное магнитное поле, направленное встречно приложенному. Итак, для магнитного поля СП-ник – непреодолимая преграда, плоскость, от которой, как от зеркала, отражается это поле. Малейшее движение магнита вызывает изменение магнитного поля - поля СП-х токов, т.е. поле как бы следит за магнитом. С увеличением магнитного поля СП-щие экранирующие токи тоже возрастают, чтобы сохранить идеальный диамагнетизм. Когда приложенное поле становится достаточно большим, поверхностные токи достигают своего критического значения и металл теряет СП-щие свойства. При

этом экранирующие токи исчезают, и магнитное поле проникает в металл.

В прошлые годы для крупных технологических установок, крупных магнитных систем, соленоидов, обмоток возбуждения электрических машин и т.д. находили применение сверхпроводники 2-го рода. Переход в нормальное состояние этих СП-ов идет в широком диапазоне изменений напряженности магнитного поля. Между максимальной (при  $T = 0$  К) шириной щели  $2d_0$  и критической температурой  $T_K$  существует прямая зависимость. По теории БКШ, удовлетворительно согласующейся с экспериментальными данными, для большого числа сверхпроводников (кроме Nb, Ta, Pb, Hg):

$$2d_0 = 3,5 \cdot k \cdot T_K, \text{ эВ}$$

Теория БКШ имела недостатки: во-первых, она была статической и, во-вторых, согласно этой теории, металлы могли быть СП-ками только до температур (24 - 30) К, [2]. Но важно то, что это была первая теория, хотя она значительно снизила интерес к СП-сти, как возможному направлению развития электротехники: получение таких температур было возможно только за счет охлаждения их сжиженным гелием ( $T_K = 4,2$  К) при обязательной защите гелия от внешнего тепла жидким азотом ( $T_K = 77,3$  К). Это дорого, сложно, к тому же СП-ки вели себя неустойчиво – они возвращались в «нормальное», резистентное состояние при токах даже небольшого значения, при попадании в электромагнитные поля. Поэтому на первом этапе попыток практического применения (в 70-80-ые годы) значительно снизился интерес инвесторов и, соответственно, финансовая поддержка исследований СП-щих материалов для промышленного применения в электротехнических изделиях. Но теоретические исследования продолжались.

В 60-е – 70-е годы в ряде стран (США, Япония) явление СП-сти при достаточно высоких температурах, выше 77 К, было открыто в соединениях типа мыла (соли высших карбоновых кислот). И хотя трудно было представить способ применения этих соединений в электротехнических изделиях, их открытие позволило предположить существование иных механизмов объяснения явления СП-сти. В 1964 г. американец В. Литтл предположил существование механизма, при котором электроны могли бы взаимодействовать, индуцируя электрический заряд на длинных органических молекулах, В то же время академик В.А.Гинзбург, [4], предложил еще один, так называемый, экситонный механизм образования куперовских пар. Эти теории предсказывали, что СП-сть может существовать даже при комнатных температурах, т.е. при 300 К.

В 1979 г. исследователи Института общей и неорганической химии АН СССР им. Н.С. Курнакова получили новую лантан - стронциевую и лантан - бариевую керамику. Эта керамика проводила ток, как обычный металл и ее электросопротивление, как и полагалось, снижалось с понижением температуры. В 1986 году ученые Цюрихского филиала фирмы ИБМ в Швейцарии Дж. Беднорц и А. Мюллер, исследуя ту же керамику, но при более низких температурах, обнаружили в ней СП-сть при 30 К. В 1987 г. на семи-

наре физиков, проводящемся в ФИАН-е под руководством В.Л. Гинзбурга, начальник лаборатории А.И Головашкин сообщил, что для одного из керамических образцов удалось получить температуру СП-го перехода  $T_K = 102$  К, [3].

Т.е. появилась возможность, вместо жидкого гелия - невозобновляемого и дорогого хладагента, - использовать жидкий азот. Но также следовало разработать технологию изготовления ВТСП - материалов с необходимыми эксплуатационными качествами и приемлемой стоимостью. Между тем создание технологии проводников из ВТСП - материалов оказалось более сложной задачей, чем технологии СП-х обмоточных материалов гелиевого уровня температур. Технология керамических СП-ов все еще находится в стадии становления из-за частичной нестабильности оксидных ВТСП - материалов, их высокой хрупкости и анизотропии.

Для создания динамической модели, объясняющей СП-сть, которая не укладывалась в теорию БКШ, предположили, что второй электрон, образующий куперовскую пару, движется по поляризованному следу первого электрона. При этом возможны 2 варианта:

1) импульсы электронов одинаковы по величине и направлению, то есть они образуют пару частиц с удвоенным импульсом;

2) импульсы электронов одинаковы по величине и противоположны по направлению. Такую корреляцию электронов также можно рассматривать, как пару с нулевым импульсом, такая пара будет обладать уникальными свойствами. [2].

В основе теоретической модели высокотемпературной сверхпроводимости, разработанной академиком В.Л. Гинзбургом, лежит так называемый экситонный механизм взаимодействия электронов: в электронной системе существуют особые волны - экситоны. Подобно фононам они являются квазичастицами, перемещающимися по кристаллу и не связанными с переносом электрического заряда и массы. Модельный образец такого сверхпроводника представляет собой металлическую пленку в слоях диэлектрика или полупроводника. Электроны проводимости, движущиеся в металле, отталкивают электроны диэлектрика, то есть окружают себя облаком избыточного положительного заряда, который и приводит к образованию электронной пары.

Такой механизм корреляции электронов предсказывает весьма высокие значения критической температуры ( $T_c = 200$  К). И действительно, в 80-е годы были открыты СП-ки с критической температурой выше температуры кипения азота. С того времени значение  $T_K$  повысилась от 30 до 130-150 К.

В настоящее время использование СП-ков в промышленности, на транспорте и, в том числе, и в энергетике теперь имеет не только смысл, но требуют немедленного исследования и внедрения. В настоящее время государственные научно - технические программы разных стран предусматривают широкий комплекс работ, включающих фундаментальные и прикладные исследования, направленные

на решение проблемы технической реализации ВТСП-сти. На эти исследования в России, США, Канаде, Японии, Китае выделяются серьезные средства как в рамках национальных, так и в рамках межнациональных программ.

Сверхпроводимость - квантовое упорядочение коррелированной по спину зарядовой системы в макроскопических масштабах кристалла. Такое коллективное состояние с "аномальными" электронными корреляциями может возникать безотносительно к конкретному механизму спаривания только в системах с максимальной делокализацией зарядовых состояний, обеспечивающей дальний порядок. В противном случае корреляции не будут носить квантовый макроскопический характер, [2].

Свойства ВТСП зависят от химического состава и технологии. Наиболее простой способ состоит в размоле металлических оксидов, прессования смеси и отжиге в атмосфере кислорода при температуре 900°C. Новое вещество образуется в результате химической реакции. Для устранения межгранулярных прослоек и получения более упорядоченной ориентации кристаллов полученное соединение подвергают плавке с последующим охлаждением. Лучшие СП-щие свойства получаются в пленочных образцах, пропускающих ток  $\sim 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

Сравнительно небольшие плотности критических токов ВТСП - одна из главных причин, сдерживающих их практическое применение.

В начале 1987 г. появились сообщения о разработке керамического материала со структурой  $YBa_2Cu_3O_7$ , в котором СП-щее состояние наступает при 93 К в поле с  $B_{кр} = 5,7$  Тл. Такие материалы имеют структуру типа перовскита (минерала  $CaTiO_3$ ). В системах Y-Ba-Cu-O в настоящее время достигнута допустимая плотность тока до  $10^4$  А/см<sup>2</sup>, что меньше, чем в металлических СП-никах. Наиболее перспективны для промышленного использования висмутовые системы  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ , температура перехода которых достигает 115 К.

Многие технологии построены на использовании серебряных компонентов. Все описанные выше и другие технологические процессы объясняют высокую стоимость ВТСП-ков. Однако за последние несколько лет цены на СП-ки упали в 7-8 раз, причем эксперты прогнозируют их дальнейшее снижение. Достаточно распространено изготовление ВТСП-ков по технологии «порошок в трубе».

В начале 2001 года ВТСП-сть была случайно открыта у соединений нового класса. Было установлено, что давно известное химикам вещество - диборид магния ( $MgB_2$ ) - переходит в СП-щее состояние при значительно более высокой температуре (около 40 К), чем все прочие соединения такого рода.  $MgB_2$  стал объектом пристального внимания многих исследователей. Несмотря на то, что у него не очень высокая температура  $T_k$  (в настоящее время получены керамики вида  $Y_xBa_xCu_xO_x$ , сохраняющие СП-щее состояние вплоть до 150 К), но это еще и очень дешевый материал, он стоит в несколько раз дешевле любого другого сверхпроводника. Кроме того:

1) это простое соединение, как по кристаллографической, так и по электронной структуре.

2) открытие СП-сти  $MgB_2$  подтверждает теорию БКШ и, в то же время, опровергает ее, смещая определенный ею предел температуры от 30 К до 40 К. Подтверждением теории, в то же время, было обнаружение изотопического эффекта - одного из первых важных открытий, сделанных сразу же после определения СП-мости  $MgB_2$ . Этот эффект заключается в том, что температура перехода в СП-щее состояние зависит от того, какой изотоп бора используется:  $B^{10}$  или  $B^{11}$ . Изотопы одного элемента, как известно, имеют идентичное электронное строение, а отличаются лишь массами. Значит, изотопический эффект - это по сути наблюдение зависимости  $T_k$  от массы атомов, что и предсказывается теорией БКШ, [1];

3) из всех соединений у  $MgB_2$  самая высокая  $T_k$ . Это связано с тем, что атомы бора легкие, а в теории БКШ сказано, что чем легче атомы, тем дольше сохраняется СП-мость;

4) важно, что  $MgB_2$  - давно известное и хорошо изученное вещество. Получение его, в отличие от керамик, не представляет трудностей.

Атомы бора в  $MgB_2$  образуют кристаллическую структуру соединения - шестиугольные "соты", очень напоминающие графитовые плоскости. Отличие от графита в том, что в  $MgB_2$  плоскости находятся прямо одна над другой, а в графите - несколько сдвинуты. Кроме того, есть еще и атомы магния, находящиеся в "сотах". Вычисления показывают, что эти атомы находятся в сильно ионизованном состоянии, близком к  $Mg^{++}$ . Будучи положительно заряженными, они как бы "вытягивают" электроны из борных плоскостей в межплоскостное пространство. Это приводит к созданию свободных носителей заряда, т.е. к проявлению металлических свойств  $MgB_2$  и существованию СП-мости, объясняемой теорией БКШ.

Технологии по изготовлению сильноточных СП-ков вышли на уровень, на котором возможно создание нового поколения электроэнергетического оборудования, существенно превосходящего оборудование традиционного (резистивного) исполнения за счет более высокой эффективности. Возможно уменьшение в 2-3 раза массогабаритных показателей и, соответственно, материалоемкости и энергозатрат на изготовление, повышения надежности и срока службы до требований электроэнергетики XXI столетия, качественных характеристик энергосистем, экологической безупречности СП-вого электрооборудования, меньшей капитальной стоимости при массовом производстве и цене СП-ка, не превышающей 10-15 долл. за 1 кА\*м, [4].

С конца 90-х годов 20 века начались попытки масштабного использования СП-ков в самых разных отраслях промышленности. Так, для подвода электроэнергии к одному из кварталов Детройта (США) был проложен сверхпроводящий кабель; примеру Детройта собираются последовать и некоторые другие американские города.

В России начала действовать совместная программа Минатома РФ и РАО ЕЭС по разработке токоограничителей на СП-ках. По оценкам Всемирного банка, уже через десять лет рынок СП-ого электротехнического оборудования будет составлять 70 млрд. долларов, а через двадцать лет превысит 240 млрд. долларов, [1,4].

В публикациях Всемирного объединения инженеров АВВ стали появляться сообщения, что к 2015 г. на рынок электротехнических изделий будет «выброшен» полный комплект электрооборудования: от турбогенератора, трансформатора, кабельных сетей из высокотемпературных сверхпроводниковых материалов до СП-ковых электроприемников. Поэтому так важно изучать особенности проектирования, работы, обслуживания и ремонта электрооборудования ТЭС и АЭС с использованием СП-щих материалов с целью определения перспективности этого направления.

Существует также проблема соединения СП-щего и «горячего» электрооборудования: механических узлов, собственных и сопрягаемых валов, полумуфт, соприкасающихся фундаментных плит, болтов, жизнеобеспечивающих трубопроводов. При малой мощности (модельные экземпляры) решение проблемы было найдено. Но с увеличением мощности, силовых и механических нагрузок на конструктивные элементы турбогенераторов эта проблема значительно усложняется и требует решения, т.к. применение СП-ти рентабельно именно в турбогенераторах большой мощности. В них удается достигнуть того, что при других технических решениях сделать невозможно, а именно, уменьшить массу и габариты машины при сохранении мощности. В этих условиях экономия энергии, получаемая за счет снижения потерь, очень быстро оправдывает те затраты, которые вкладываются в создание новых машин. Экономически это, конечно, оправдано, но нужно решать и более трудную проблему - обеспечение высокой надежности.

Высокотемпературное СП-щее оборудование более устойчиво к внешним возмущениям, а криогенная система азотного уровня более надежна в эксплуатации. Важным положительным фактором, позволяющим существенно упростить конструкцию высоковольтной изоляции, является высокая диэлектрическая прочность жидкого азота, сравнимая с диэлектрической прочностью трансформаторного масла.

#### **Выводы**

1. Сильноточные СП-вые технологии позволяют создавать новое поколение электроэнергетического оборудования, существенно превосходящего оборудование традиционного исполнения за счет более высокой эффективности, уменьшения массогабаритных показателей, материалоемкости и энергозатрат на изготовление, повышение надежности и срока службы, а также цене СП-ка, не превышающей 10-15 долл. за 1 кА·м.

Перспективно электротехническое оборудование в СП-шем исполнении, на базе ВТСП - технологий: электромашины мощностью порядка мегавольтампер, трансформаторы мощностью до 1,5 МВ·А,

участки кабельных линий электропередачи, рассчитанные на мощность до 440 МВ·А и т.д.

Широкое применение СП-вого электротехнического оборудования, как при генерации электроэнергии, так и при ее транспортировке и потреблении, позволит увеличить эффективность использования электроэнергии на 5-7%, а, следовательно, практически на эту же величину сократить потребление первичных энергоносителей, которыми преимущественно являются органические топлива.

Преобразующее значение технологий не ограничивается экономией первичных энергоносителей. Преобразование непосредственно коснется всех областей деятельности, где в больших масштабах находит применение электротехническое оборудование: электроэнергетика, машиностроение, металлургия, горнодобывающая и перерабатывающая промышленности, наземный, морской и воздушный транспорт, атомная промышленность.

Наиболее ощутимый эффект принесет комплексное использование СП-ого оборудования, например, полностью состоящая из СП-ого оборудования электростанция или распределительная подстанция. Тогда будет более дешевой электроэнергия, более надежная работа оборудования и наиболее приемлемой экологическая ситуация. Но и отдельные элементы СП-ого оборудования смогут значительно улучшать ситуацию в существующих энергосистемах и сетях, увеличив их устойчивость, надежность и пропускную способность.

Учитывая перспективы применения СП-щего оборудования во всех областях электротехники, наиболее важными задачами являются технические проблемы, связанные с правильным выбором материалов для изготовления низкотемпературного оборудования. Поэтому важно исследование поведения материалов при низких температурах, определение их основных электротехнических характеристик при глубоком охлаждении. Для электрических машин задача выбора материала является первоочередной, т.к. во вращающихся машинах к температурным нагрузкам добавляются механические.

#### **Список литературы**

1. Шевченко В.В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине. // *Енергетика та електрифікація*. № 7(287), 2007, с. 11-16.
2. Шевченко В.В., Гавриш А.Ю. Современное состояние и перспективы применения сверхпроводников в электроэнергетике. // *Системи обробки інформації. Харківський університет повітряних сил*. Вип. 5(45). 2005, с. 194-204.
3. Анималу А. *Квантовая теория кристаллических твердых тел*. - М.: Мир, 1981.
4. Крекнелл А., Уонг К. *Поверхность Ферми*. М.: Атомиздат, 1978.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. *Физика твердого тела*. - М.: Высшая школа, 1993.

Поступила в редколлегию 19.11.2009

Рецензент: проф. Шелепов И.Г.

**Опубликовано:**

[Шевченко В.В., Омельченко Л.Н., Заныхайло Е.А. Анализ особенностей работы материалов при криогенных температурах и выбор материалов для энергетических установок ТЭС и АЭС / Сборник научных трудов "Системы управления, навигации и связи" (ISSN 2073-7394), №4(12). - Киев: ГП "ЦНИИ навигации и управления", 2009. - С. 135-142].