

Лекция 10

3. Материалы, используемые в нетрадиционной и возобновляемой энергетике

Сверхпроводящие материалы и их применение в энергетике

Сверхпроводимость кристаллических твердых тел

У многих из металлов, а также некоторых сплавов и химических соединений электрическое сопротивление становится равным нулю, а магнитный поток выталкивается из образца при их охлаждении ниже некоторой температуры. Это явление получило название *сверхпроводимости*.

Основные экспериментальные факты. Сверхпроводимость была открыта Камерлинг-Оннесом в 1911 г., когда он в ходе исследования электрических свойств металлов при низких температурах заметил, что при $T < 4,15$ К сопротивление ртути обращается в нуль (рис. 10.1). Вскоре это же явление было обнаружено во многих металлах. В настоящее время сверхпроводимость найдена у 22 металлов, у которых критическая температура сверхпроводящего перехода T_C меняется от 0,012 К для вольфрама до 9,22 К для ниобия. Не обнаружена сверхпроводимость в щелочных, щелочно-земельных, «благородных» (включая *Cu*) и большинстве редкоземельных (кроме *La*) металлах. Сверхпроводящими являются многие сплавы, причем с температурами T_C в ряде случаев более высокими, чем в моноатомных металлах. «Рекордсменом» сверхпроводимости долгое время был сплав Nb_3Ge с $T_C \approx 23$ К. Сверхпроводники, в которых температура сверхпроводящего перехода не превышает 25 К получили название низкотемпературных сверхпроводников (НТСП).

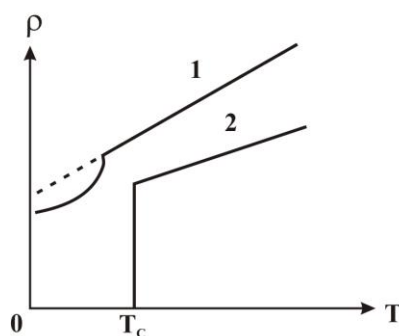


Рис. 10.1. Температурные зависимости удельного сопротивления ρ нормального металла (кривая 1) и переходящего в сверхпроводящее состояние при $T = T_c$ (кривая 2).

В 1986 г. Беднорц и Мюллер обнаружили сверхпроводимость в соединении $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ с температурой сверхпроводящего перехода ~ 30 К. Это открытие произвело сенсацию и стимулировало интенсивные поиски других неметаллических высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с $T_C > 30$ К, тем более что синтез их оказался несложным. В течение довольно короткого времени был обнаружен целый ряд других сложных химических соединений со значительно более высокими значениями T_C . В 1987 г. высокотемпературная сверхпроводимость была обнаружена в соединении $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с температурой перехода $T_C \sim 90$ К, что выше температуры жидкого азота. Еще большие значения T_C (~ 120 К) были вскоре получены в более сложных купратах, а в 1994 г. сверхпроводимость с $T_C \sim 135$ К при атмосферном давлении и 160 К при высоком давлении была обнаружена в соединении $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$.

Существенно, что сверхпроводимость - это не «очень маленькое сопротивление», а отсутствие его. Ток, возбужденный в сверхпроводящем контуре, не затухает в течение многих часов, и это позволяет сделать вывод, что сопротивление сверхпроводника, во всяком случае, меньше, чем $10^{-16} \cdot \rho_0$, где ρ_0 - сопротивление нормального металла при той же температуре. Как будет показано ниже, теоретические соображения тоже говорят в пользу нулевого сопротивления сверхпроводника.

Вскоре после открытия сверхпроводимости было обнаружено, что она разрушается магнитным полем и пропускание электрического тока высокой плотности. Величины критических магнитных полей $H_c(0)$, разрушающих сверхпроводимость при $T = 0$ К, в чистых металлах варьируются от 10^4 Тл для W до 0,1944 Тл для Nb . В сплавах и высокотемпературных сверхпроводниках значения H_c оказываются значительно большими, чем в чистых металлах. Например, в сплаве Nb_3Ge $H_c(0) = 60$ Тл.

Эксперименты показали, что с повышением температуры величины H_c уменьшаются по закону

$$H_c \cong H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right], \quad (10.1)$$

Величины плотности тока J_c , разрушающего сверхпроводимость, также варьируются для различных сверхпроводников в очень широких пределах, достигая, например, в пленках высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ она составляет величину $\sim 10^9 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. В чистых металлах и ряде сплавов величины J_c определяются тем магнитным полем, которое создается током.

Фундаментальным свойством сверхпроводников является *выталкивание магнитного потока* из сверхпроводящих образцов (рис. 10.2). Этот эффект был открыт в 1933 г. Мейсснером и Оксенфельдом, а также независимо Шубниковым.

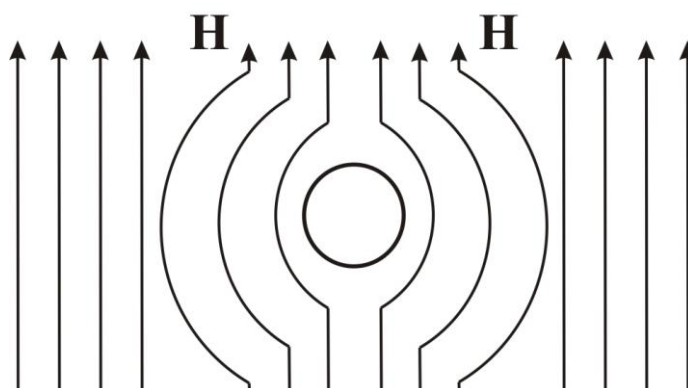


Рис. 10.2. Выталкивание магнитного потока из сверхпроводящей сферы при $T < T_c$

Следует заметить, что полное выталкивание имеет место, только если размагничивающий фактор образца (эллипсоида) в направлении приложенного магнитного поля не превышает $4\pi(1 - H/H_c)$. В противном случае образец разбивается на домены сверхпроводящей и нормальной фазы с размерами $\sim 10^{-4}$ см. Такому состоянию сверхпроводника Ландау дал название *промежуточного состояния*.

Кроме того, магнитная индукция внутри образца исчезает не скачком, а убывает с глубиной по экспоненте на эффективной длине λ , называемой *лондоновской глубиной* проникновения магнитного потока в сверхпроводник (см. ниже), которая при $T = 0$ К составляет величину $\sim 10^{-5}$ см и с ростом температуры возрастает по закону

$$\lambda(T) = \lambda(0)(1 - T/T_c)^{-1/2}. \quad (10.2)$$

Заметим, что выталкивание магнитного потока является фундаментальным свойством сверхпроводника, а не следствием обращения в нуль его сопротивления (как в идеальном проводнике при $T = 0$). Это выталкивание происходит независимо от магнитной «предыстории» образца - производилось ли его охлаждение после или до приложения магнитного поля. (Если бы выталкивание магнитного потока было следствием отсутствия сопротивления, то, как легко убедиться с помощью уравнений Максвелла, предыстория оказывала бы определяющее влияние на величину магнитной индукции в сверхпроводнике.)

Эффект Мейсснера-Оксенфельда дает некоторое основание рассматривать сверхпроводник как идеальный диамагнетик, обладающий магнитной восприимчивостью $\chi = -1/(4\pi)$ или нулевой магнитной проницаемостью $\mu = 0$.

С точки зрения характера влияния магнитного поля на сверхпроводимость все сверхпроводящие материалы принято делить на *сверхпроводники I и II рода*. В сверхпроводниках I рода сверхпроводящее состояние, а, следовательно, и выталкивание магнитного потока пропадают (при увеличении поля) при некотором поле H_c (рис. 10.3а) во всем объеме образца (или во всем объеме сверхпроводящих доменов, если имеет место

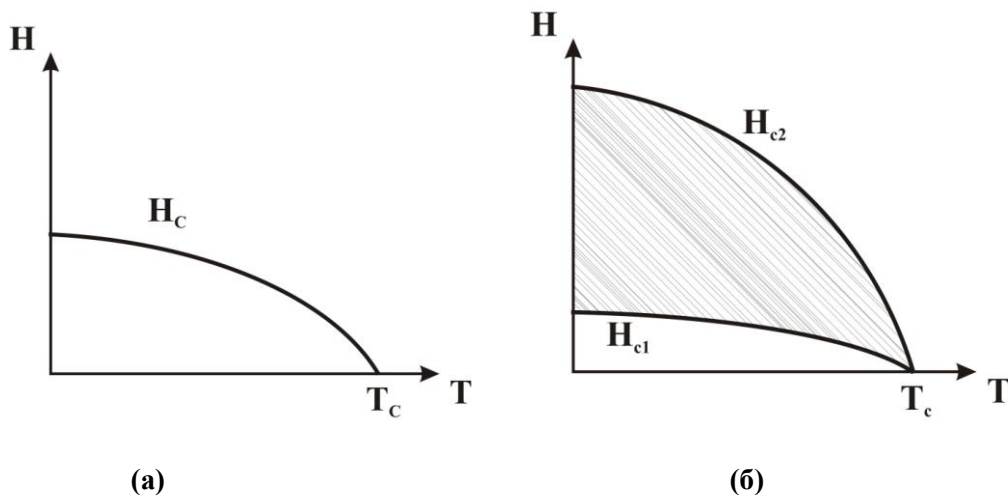


Рис. 10.3. Зависимости критических магнитных полей от температуры для сверхпроводника первого (а) и второго (б) рода. Заштрихована область смешанного состояния

промежуточное состояние). В сверхпроводниках II рода (рис. 10.3б) выталкивание магнитного потока начинается в относительно слабом *первом критическом поле* H_{c1} , и полностью выталкивается лишь при достижении, так называемого *второго критического поля* H_{c2} , выше которого сверхпроводимость исчезает.

К сверхпроводникам первого рода относятся достаточно совершенные (бездефектные) металлы. Ниобий и все сверхпроводящие сплавы и соединения, в том числе и высокотемпературные, являются сверхпроводниками второго рода. Величины критических полей при $T \rightarrow 0$ К, наряду со значениями критической температуры, для ряда сверхпроводников первого и второго рода приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1. Критические параметры некоторых сверхпроводящих материалов

Сверхпроводник	T_c , К	$H_c(T = 0)$, мТл
<i>Hg</i>	44.15	4,11
<i>Sn</i>	3,72	3,05
<i>Pb</i>	7.19	8,03

<i>Nb</i>	9,26	1,944
<i>Nb₃Ge</i>	23	
<i>Ba_{2-x}La_xCuO₄</i>	~ 30	
<i>YBa₂Cu₃O_{7-δ}</i>	87-93	

Состояние, свойственное сверхпроводникам второго рода, получило название *смешанного состояния*. Магнитный поток проникает в сверхпроводник второго рода между критическими полями H_{c1} и H_{c2} не в виде доменов, как при промежуточном состоянии, а в виде *вихрей Абрикосова*. Последний можно схематически представить собой как тонкую нить магнитного потока с нормальной сердцевиной, окруженную вихревыми сверхпроводящими токами (рис. 10.4).

Важным экспериментальным фактом для сверхпроводников второго рода является *квантование магнитного потока* вихря. Величина этого кванта постоянна и составляет величину

$$\Phi_0 = \frac{\pi\hbar c}{e} \cong 2,07 \cdot 10^{-7} \quad (10.3)$$

Другими словами, при изменении температуры или магнитного поля (в пределах $H_{c1} \div H_{c2}$) изменяется *число* вихрей, но не величина заключенного в каждом вихре магнитного потока. В более или менее совершенных кристаллах образуются правильные решетки вихрей.

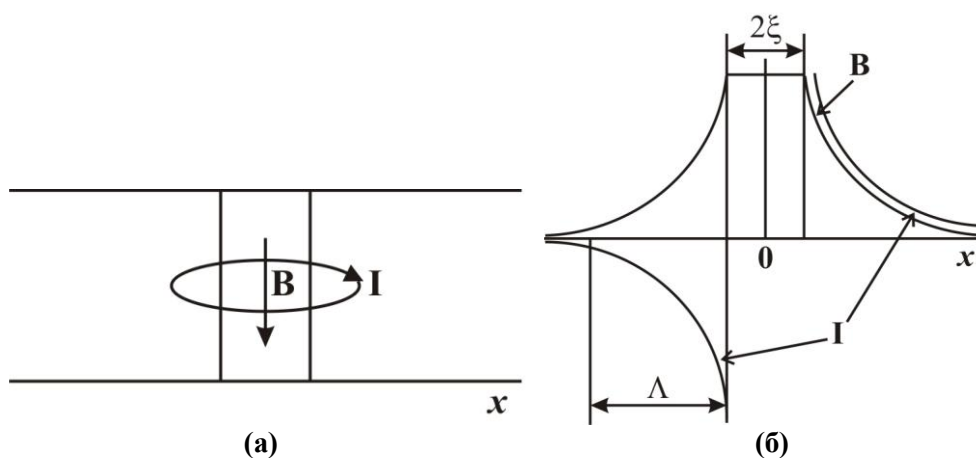


Рис. 10.4. Вихрь Абрикосова в плоском образце сверхпроводника второго рода: *a* - схематический вид вихря в разрезе; *b* - зависимости магнитной индукции B и тока I от расстояния до оси вихря. Λ - глубина проникновения магнитной индукции в сверхпроводник, ξ - радиус корреляции параметра порядка (размер куперовской пары, длина когерентности)

Большую роль в процессах, происходящих в сверхпроводниках второго рода, играет эффект *пиннинга* (*закрепления*) вихрей на различных дефектах. Пиннинг вихрей нарушает правильную решетку вихрей и оказывает определяющее влияние на величину критической плотности тока, при которой сверхпроводимость разрушается.

Все приведенные экспериментальные факты были обнаружены и исследованы в металлических сверхпроводниках. Многие из этих свойств наблюдаются и в ВТСП. Приведем некоторые параметры сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, который получен в виде поликристаллической керамики, монокристаллов и пленок и является наиболее изученным (своего рода, «модельным») высокотемпературным сверхпроводником. Температура сверхпроводящего перехода в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ составляет $87 \div 93$ К в зависимости от величины δ , которая зависит от условий синтеза. Соединение $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ является типичным сверхпроводником второго рода с критическими полями $H_{c1} \approx 2 \cdot 10^{-3}$ Тл и $H_{c2} \approx 30$ Тл. Критические плотности тока J_c для него составляют: в керамике - $5 \cdot 10^4$ А·см⁻², в монокристаллах (для разных кристаллографических направлений) от 10^5 до 10^6 А·см⁻², в пленках - более 10^6 А·см⁻².

Природа сверхпроводимости. В соответствии с существующей теорией Бардина-Купера-Шриффера, перевод материала в сверхпроводящее состояние связан с фазовым переходом, при котором свободные электроны перестают взаимодействовать с ионами кристаллической решетки и вступают во взаимодействие (притяжение) между собой (*куперовское спаривание*). В обычном, неспаренном состоянии электроны рассеиваются на примесях и дефектах, имеющих в металле, или на тепловых колебаниях кристаллической решетки – фононах, что и приводит к возникновению электрического сопротивления. После объединения в куперовские пары (ниже температуры перехода T_C) электроны перестают рассеиваться, поскольку энергия фононов, которую пара может получить от взаимодействия с ними или дефектами решетки при криогенных температурах, слишком мала. Не испытывая рассеяния, куперовские пары движутся сквозь решетку кристалла без сопротивления, что и приводит к исчезновению нормального электрического сопротивления при охлаждении ниже температуры T_C (см. рис. 10.1).

Прикладные свойства сверхпроводящих материалов

Одним из главных преимуществ некоторых видов сверхпроводящих материалов является возможность достижения в них высоких плотностей тока. Это очень важно, поскольку, чем выше плотность тока, тем приборы и устройства будут компактнее и

легче. В результате, становится меньше масса, которую необходимо охлаждать, а также ниже расход дорогостоящих сверхпроводящих материалов. Например, сверхпроводящие соленоиды для получения магнитного поля и кабели для передачи электрического тока в десятки (а иногда и сотни) раз меньше по объему и весу тех, что изготавливаются из меди. Это позволяет снизить капитальные и эксплуатационные расходы установок, использующих сверхпроводники.

Как отмечено выше, среди металлов наивысшей температурой сверхпроводящего перехода имеет ниобий ($T_C = 9,2 - 9,4$ К). Однако для него характерны низкие значения критического магнитного поля H_C ($\sim 0,24$ Тл) и критического тока J_C ($\ll 10^6$ А/см²), что не способствует его широкому применению.

Существенно лучшим сочетанием критических параметров T_C , H_C и J_C (при хорошей технологичности) отличаются металлические сплавы ниобия с титаном и цирконием, а также интерметаллические соединения на основе ниобия (с цирконием, титаном, оловом и германием) и ванадия (с кремнием и галлием). В табл. 10.2 приведены критические параметры металлических сверхпроводников, представляющих прикладной интерес.

Как видно из табл. 10.2, сплавы и соединения на основе ниобия и ванадия переходят в сверхпроводящее состояние при температурах существенно выше температуры жидкого гелия (4,2 К). При этом они могут выдерживать довольно сильные магнитные поля при достаточно высокой критической плотности тока.

Таблица 10.2. Критические параметры сверхпроводящих металлических материалов

Сверхпроводящий материал	Критический параметр	
	T_C , К	H_C , Тл (при $T = 4,2$ К)
Nb-Zr	9-11	7-9
Nb-Ti	8-10	9-13
Nb ₃ Sn	18,0	22-25
Nb ₃ Al _{1-x} Ge _x	20,3-20,5	40
Nb ₃ Ga	20,2	34
Nb ₃ Ge	23,2	37
V ₃ Ga	14,5-15,0	21
V ₃ Si	17,0	23

К наиболее распространенным металлическим сверхпроводящим материалам относится сплав Nb-46,5 вес.%Ti, который характеризуется высокой технологичностью, так что из него обычными методами плавки, обработки давлением и термической обработки можно изготавливать проволоки, кабели и шины. Интерметаллиды, хотя и обладают существенно более высокими значениями критических параметров, имеют значительную хрупкость, что затрудняет изготовление из них проводов и кабелей большой длины традиционными методами металлургической технологии.

При изготовлении сверхпроводящего кабеля необходимо вокруг сверхпроводящего провода создать стабилизирующее покрытие из меди, обладающей высокой тепло- и электропроводностью. Это необходимо для быстрого перевода электрического тока в медное покрытие и отвода тепла при случайном срыве сверхпроводника в нормальное состояние при пропускании высоких плотностей электрического тока. Действительно, если в какой-либо жиле сверхпроводимость случайно нарушится, то высокая электро- и теплопроводность медной матрицы дает возможность осуществить термическую стабилизацию сверхпроводника в докритическом режиме. При отсутствии такой матрицы может произойти локальное расплавление сверхпроводящего провода и выход дорогостоящего устройства (например, магнита) из строя.

Для повышения рабочих токов (а следовательно, достигаемых магнитных полей) создают многожильные кабели типа сверхпроводник-медь. При изготовлении таких кабелей в бруске меди круглого или гексагонального сечения просверливают отверстия, в которые запрессовывают тонкие стержни из сплава Nb - Ti. Полученный композиционный брусок превращают в тонкие стержни (путем протяжки через специальные фильеры или экструзией), разрезают их на куски, которые снова вставляют в новые бруски меди. Повторяя многократно эту операцию, получают кабель с большим числом сверхпроводящих жил, из которого затем наматывают катушки для сверхпроводящих соленоидов (рис. 10.5).

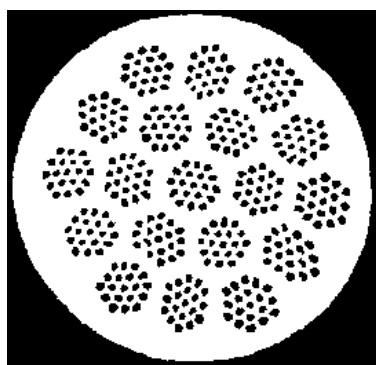


Рис. 10.5. Поперечное сечение многожильного сверхпроводящего композиционного кабеля с ниобий-титановыми жилами в медной матрице

Применение хрупких интерметаллидов значительно усложняет изготовление сверхпроводящих кабелей. Для получения проводов из хрупкого сверхпроводящего соединения Nb_3Sn используют так называемую «бронзовую технологию», основанную на селективной твердофазной диффузии олова в ниобий (рис. 10.6). В этой технологии сначала получают многожильный композит, состоящий из ниобиевых жил, которые заключены в матрице из оловянной бронзы, содержащей (10 – 13) вес.% Sn. Начальный этап этой технологии получения композиционных кабелей похож на ту, что описана выше и изображена на рис. 2.30. После многократного волочения и повторяющихся запрессовок бронзово-ниобиевых многожильных стержней в бронзовую матрицу получают композиционные заготовки, которые подвергают промежуточным низкотемпературным отжигам (для снятия внутренних напряжений с целью повышения пластичности для последующих процедур волочения). На финальной стадии полученный композиционный кабель ниобий-бронза нужного диаметра (от долей до нескольких миллиметров) подвергают специальной термической обработке, при которой происходит диффузия олова в ниобий, тогда как из-за ничтожной растворимости меди в ниобий практически не диффундирует. В результате на поверхности ниобиевых жил формируется тонкая пленка соединения Nb_3Sn (рис. 10.6), а бронзовая матрица по своим свойствам приближается к меди (из-за ухода из нее олова). Полученные многожильные провода достаточно эластичны, легко гнутся и наматываются, сохраняя хрупкие пленки Nb_3Sn целыми.

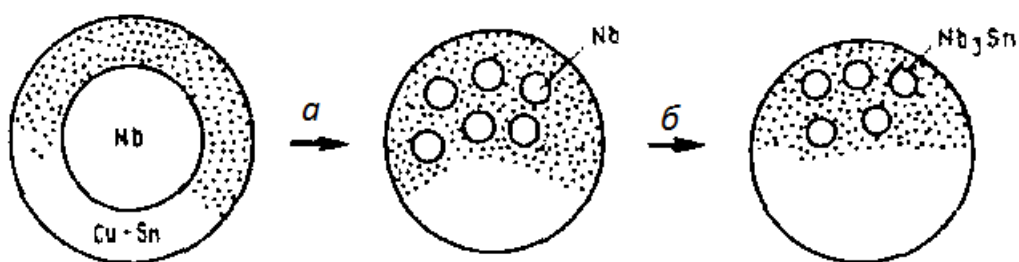


Рис. 10.6. Схема осуществления «бронзовой технологии» изготовления многожильных кабелей на основе Nb_3Sn : *a* - сборка, волочение и отжиг; *б* – термообработка

Для получения сверхпроводящих лент из соединений интерметаллидов кроме «бронзовой технологии» применяют метод химического осаждения из газовой фазы. Его использование позволяет, к примеру, синтезировать соединение Nb_3Ge , имеющее одну из наиболее высоких критических температур сверхпроводящего перехода среди металлических сверхпроводящих материалов.

Технологичность, благоприятное сочетание электрических и механических свойств и сравнительно низкая стоимость позволяет использовать сверхпроводники на основе твердого раствора Nb - Ti в качестве основных материалов для получения магнитных полей до $B_{кр} = 8$ Тл при работе в жидком гелии. Для создания более сильных полей (до 12-14 Тл), когда плотность тока в этом сплаве существенно падает, используют кабели на основе соединения Nb₃Sn, полученные по описанной выше «бронзовой технологии».

В конце 80-х годов была открыта высокотемпературная сверхпроводимость в керамических материалах на основе сложных оксидов. Однако их практическое использование пока не достигло того распространения, которое получили низкотемпературные сверхпроводники металлического типа.

Наиболее важными областями применения сверхпроводников в энергетике является создание соленоидов, которые необходимы для получения и накопления электроэнергии, а также создания сильных магнитных полей. Заметим, что с помощью обычного электромагнита, представляющего собой катушку из медного провода, размещенную на железном сердечнике, можно создавать поля не выше 2 Тл. Поскольку медные провода выдерживают плотность тока не более 400 А/см², при более высоких плотностях тока такой электромагнит потребует больших затрат на специальное охлаждение медного провода. Сверхпроводники позволяют отказаться от железного сердечника за счет увеличения плотности тока до 10⁶ А/см² при температуре жидкого гелия (4,2 К).

Сверхпроводящие магниты используют для исследований в области физики высоких энергий, создания мощных магнитных кольцевых ускорителей частиц и систем управления движением пучков частиц на выходе из ускорителя. Соленоид из сверхпроводящего материала может работать без подвода энергии извне сколь угодно долго, поскольку однажды возбужденный в нем ток не затухает. Поддержание соленоида в сверхпроводящем состоянии не требует больших энергетических затрат. При нулевом сопротивлении легко решается проблема теплоотвода. Кроме того, сверхпроводящие магниты намного компактнее обычных.

Эффект сверхпроводимости может быть также использован для изготовления сверхпроводящих генераторов электроэнергии значительно большей единичной мощности, чем генераторы традиционной конструкции. Сверхпроводящие турбогенераторы имеют более высокий коэффициент полезного действия при меньших размерах и в три раза меньшей массе. Сверхпроводящие материалы могут повысить КПД генераторов большой мощности до 99,5 %, тогда как у обычных генераторов он не превышает 98,6 %. Ежегодная экономия топлива в этом случае составит примерно 1 %.

С ростом потребляемых мощностей всё острее становится проблема передачи энергии. И в воздушной, и в кабельной линии электропередачи приблизительно десятая часть энергии безвозвратно теряется при нагреве токопроводящих жил. В перспективе передачу энергии большой мощности можно осуществлять с помощью сверхпроводящих кабельных линий электропередачи. Принципиально конструкции сверхпроводящих кабелей постоянного и переменного тока не отличаются друг от друга. Сам по себе сверхпроводящий материал намного дороже меди, но токонесущая жила оказывается дешевле, поскольку по сверхпроводящему проводу сечением 1 мм^2 можно пропускать не 1-2 А, а до 10 кА.

Технико-экономический анализ показывает, что при передаче электроэнергии большой мощности благодаря малой удельной материалоемкости и меньшей ширине трассы сверхпроводящий кабель будет в 2-3 раза дешевле обычного. При этом он характеризуется большей пропускной способностью и меньшими потерями. Основная трудность, которая возникает при прокладке сверхпроводящего кабеля, - тепловая защита сверхпроводника. Предохранить кабель от большого притока тепла извне можно с помощью вакуумной изоляции. Сверхпроводящие кабели в линиях электропередачи имеют вид многослойных труб с вакуумной изоляцией между ними и, в сущности, представляет собой длинный криостат (см. рис. 10.7). В этом случае внутренние трубы покрываются слоем сверхпроводящего материала и заполняются жидким гелием. Между первой (внутренней) и второй трубами делается вакуумная изоляция, между второй и третьей течёт жидкий азот, а между третьей и четвёртой (наружной) снова делается вакуумная изоляция.

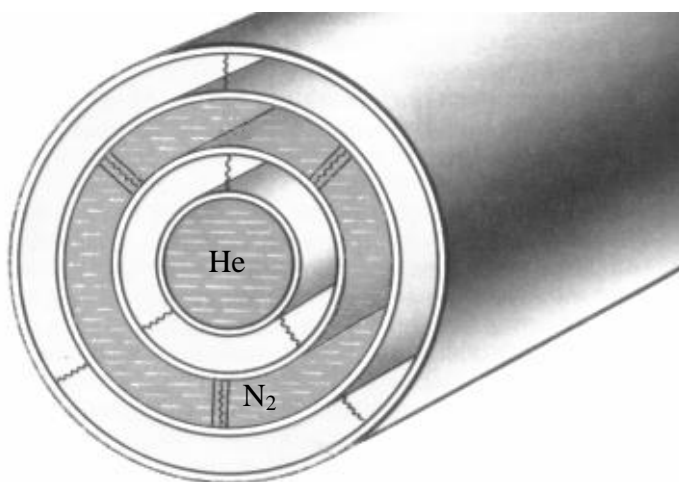


Рис. 10.7. Строение сверхпроводящего кабеля

Несмотря на простоту конструкции, монтаж такой линии сопряжён со значительными трудностями. Надо обеспечить герметичность кабеля на достаточно большой длине, собирая его из отдельных коротких отрезков; разработать рефрижераторы, концевые устройства и другое оборудование, необходимое для стабильного функционирования таких линий передач.

Без применения мощных сверхпроводящих магнитов нельзя решить проблему термоядерной энергетики, поскольку для осуществления управляемой термоядерной реакции (синтеза ядер гелия из ядер дейтерия) необходимо удерживать в реакционном пространстве горячую тритий-дейтериевую плазму, нагретую до $10^6 - 10^9$ °С. Поскольку плазма состоит из движущихся заряженных частиц, на их траектории можно воздействовать сильным магнитным полем. Тогда при соответствующей геометрии магнита можно, несмотря на высокие скорости частиц, удержать их в некотором реакционном объеме. Поскольку необходимые для этого магнитные поля столь велики, их создание экономически будет оправдано только при использовании сверхпроводящих магнитов. Наиболее перспективными термоядерными реакторами считаются установки типа «Токамак», интенсивно разрабатываемые исследователями в разных странах, хотя прорывных успехов в этой области пока не достигнуто.

Значительный вклад в решение энергетической проблемы возможен с использованием так называемых МГД-генераторов за счет повышения термодинамического коэффициента полезного действия тепловых электростанций. В этом случае, ионизированные продукты сгорания топлива (в виде низкотемпературной плазмы) с температурой около 2500 °С пропускают с большой скоростью через сильное магнитное поле. Образовавшийся за счет разделения зарядов в магнитном поле электрический ток снимается с помощью электродов, расположенными вдоль плазменного канала. Использование такой технологии означает прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Сверхпроводимость можно также использовать для запасания электроэнергии впрок с выдачей ее при пиковых нагрузках с помощью накопителей индуктивного типа. Такой накопитель энергии представляет собой тороидальный криостат диаметром несколько метров, внутри которого создан соленоид, по виткам которого практически без потерь циркулирует ток. Сверхпроводящие накопители энергии обошлись бы на 3% дешевле, чем обычные, а общие капитальные затраты уменьшаются еще на 5%.

Криогенные сверхпроводящие материалы могут найти применение в электродвигателях и трансформаторах, что позволяет уменьшить их объем, снизить массу на 80 % и довести коэффициент полезного действия до 98 %. Сильные магнитные поля

криогенных сверхпроводящих устройств могут быть использованы для защиты космических кораблей от действия космических излучений.

Есть ещё одна проблема, удачно решённая с помощью такого уникального свойства сверхпроводников как идеальный диамагнетизм, который проявляется в виде эффекта левитации. Замена колёс так называемой «магнитной подушкой» позволит увеличить скорость железнодорожного транспорта, добиться плавности хода, отсутствия шума и устранения вибрации при движении поезда. Стоимость сооружения пути длиной 500 км составляет в 1,5 – 4,5 млрд. долл. Стоимость самих поездов составит не более 10 % от общей суммы затрат, а система охлаждения всего 1 %.