

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИФИ»

Е.А. Дергунова, Л. В. Потанина, И. Н. Губкин

**ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ NbTi  
СВЕРХПРОВОДНИКОВ.  
ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Учебное пособие

Москва 2009

УДК 620.22:[621.315.5::538.945](075)

ББК 32.232я7

Д36

Дергунова Е. А., Потанина Л. В., Губкин И. Н. **Основы материаловедения NbTi сверхпроводников. Применение сверхпроводников.** Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2009. — 48с.

В учебном пособии «Основы материаловедения сверхпроводников на основе Nb-Ti сплавов. Применение сверхпроводников» по дисциплине «Основы материаловедения технических сверхпроводников» рассмотрены особенности фазовой диаграммы системы Nb-Ti и сверхпроводящие свойства NbTi сверхпроводников. Основное внимание уделено металлургическим проблемам получения сверхпроводников на основе Nb-Ti сплавов и факторам, определяющим их критические свойства. Описаны этапы изготовления сверхпроводников на основе Nb-Ti сплавов и области применения высоко-точных и слаботочных сверхпроводников.

Предназначено для студентов, специализирующихся в области физического материаловедения по специальности «Физика металлов».

*Рецензент канд. физ.-мат. наук И. А. Евстюхина*

Рекомендовано редсоветом МИФИ  
к изданию в качестве учебного пособия

ISBN 978-5-7262-1181-0

©Национальный исследовательский  
ядерный университет "МИФИ, 2009.

## Оглавление

Введение.....	4
1. Особенности диаграммы состояния в системе Nb-Ti.....	6
2. Сверхпроводящие свойства Nb-Ti сплавов .....	8
3. Основные этапы изготовления сверхпроводников на основе Nb-Ti сплавов.....	14
4. Основные технологические факторы, влияющие на критическую плотность тока в Nb-Ti сверхпроводниках	16
5. Требования, предъявляемые к Nb-Ti сплавам для производства технических сверхпроводников .....	22
6. Способы сборки составных заготовок .....	24
7. Применение сверхпроводников .....	26
7.1. Применение сильноточных сверхпроводников.....	27
7.2. Слаботочные сверхпроводниковые технологии .....	40
8. Мировой рынок сверхпроводников: история и прогноз ....	44
Контрольные вопросы: .....	46
Список рекомендуемой литературы.....	47

## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря сочетанию высокой плотности критического тока, прочности и пластичности ниобий-титановые сверхпроводники в медной матрице широко используются для изготовления токонесущих элементов магнитных систем как крупномасштабных, так и лабораторных установок, обеспечивающих развитие физики высоких энергий. На их основе мировым сообществом созданы магнитные системы ускорителей Теватрон (США), HERA (Германия), RHIC (США), LHC (Швейцария), крупнейшего тороида *Supra Tore* (Франция), дипольных магнитов установки TRISTAN (Япония), крупнейшей установки LHD (Япония) и др. В последнее время особую актуальность приобрели исследования этих материалов в связи с созданием Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР силами мирового сообщества, включая и вклад России. Ниобий-титановые сверхпроводники будут использованы в полоидальных обмотках и корректирующих катушках его магнитной системы.

Как видно из табл. 1 требования к характеристикам  $Nb_3Sn$  и  $NbTi$  сверхпроводников для различных составляющих магнитной системы заметно отличаются, при этом оставаясь на высоком уровне и для тех и для других материалов. Необходимость получения значительного объема сверхпроводников для ИТЭР активизировала научные разработки с целью повышения их токонесущей способности и оптимизации процессов получения. Кроме того, после окончания промышленного выпуска сверхпроводников для ИТЭР значительные производственные мощности будут подготовлены для дальнейшего использования при выпуске новых сверхпроводящих композиционных материалов для различных применений. Все это обуславливает необходимость развития и углубления научных исследований в области низкотемпературной сверхпроводимости.

Ниобий-титановые сверхпроводники, которые часто называют «рабочей лошадкой сверхпроводимости», обладают рядом преимуществ по сравнению с другими материалами.

Таблица 1. Спецификация ИТЭР на Nb<sub>3</sub>Sn и NbTi сверхпроводники

Nb <sub>3</sub> Sn Сверхпроводники для обмотки центрального соленоида и катушек тороидального поля	$J_c$ (А/мм <sup>2</sup> ) @ 12 Т; 4,2 К; $e=-0,25\%$	≥ 800	≥ 700
	$T_{cm}$ (К)	18	17
	$B_{cm}$ (Т)	28	32
	Гистерезисные потери (мДж/цикл) ± 3 Т цикл	≤ 600	≤ 400
	Отношение “медь-к-не-меди”	1,0	
	Сг - покрытие (мкм)	1 – 2	
	Параметр резистивного перехода $n$ в поле 12 Тл и 4,2 К	20	
	RRR	≥ 100	
NbTi Сверхпроводник для полоидальных обмоток и корректирующих катушек	$J_c$ (А/мм <sup>2</sup> ) @ 5Т; 4,2 К	≥2900	
	$T_c$ (5Тл) (К)	7,17	
	Отношение “медь к не меди”	1,6/1	
	Диаметр волокна (мкм)	< 7	
	Ni-покрытие (мкм)	1 – 2	
	RRR	≥100	
	Гистерезисные потери (мДж/см <sup>3</sup> ) ± 1.5 Тл цикл	< 55	
	Параметр резистивного перехода “ $n$ ” (6,4 Тл)	≥20	

Это высокие пластичность и прочность, относительная дешевизна, а также хорошо разработанная технология изготовления кабелей и магнитов. При исследовании сверхпроводящих материалов справедливы все общеизвестные принципы, характерные и для других областей современного материаловедения. Степень корреляции между физическими свойствами готовых сверхпроводников и характеристиками исходных материалов и полуфабрикатов зависит от уровня знания состояния материалов и особенностей процессов их изготовления. Поскольку фазовые превращения играют большую роль в повышении сверхпроводящих свойств проводников, исследование их характеристик уместно начать с рассмотрения фазовой диаграммы системы Nb-Ti.

## 1. ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ Nb-Ti

Фазовые превращения играют большую роль в повышении сверхпроводящих свойств NbTi проводников, поэтому рассмотрим фазовую диаграмму системы Nb-Ti (рис.1).

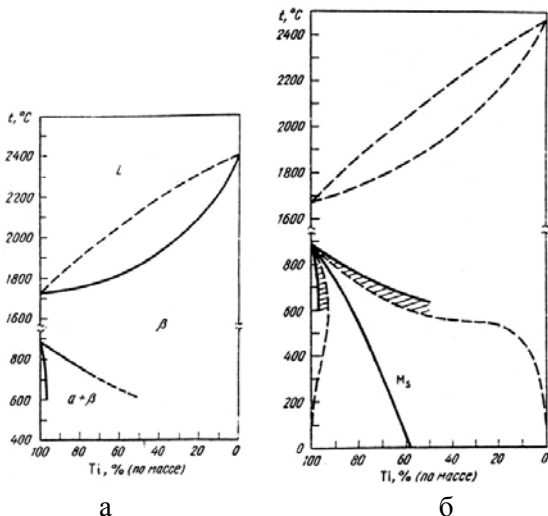


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы Nb-Ti (а); границы раздела фаз в системе Nb-Ti согласно современным оценкам (б)

На высокотемпературном участке диаграммы имеется достаточно широкий интервал между ликвидусом и солидусом. Существование этого интервала ответственно за развитие значительной дендритной ликвации в литых сплавах, следовательно для их гомогенизации требуется длительный отжиг, обычно при температурах  $>1300\text{ }^\circ\text{C}$ . У используемых для практических целей сплавов, содержащих 44-55 масс. % Ti, температура солидуса составляет 1840-1980  $^\circ\text{C}$ , а ликвидус располагается на уровне 2150-2250  $^\circ\text{C}$ . При температуре 885  $^\circ\text{C}$  наблюдается превращение  $\beta$ -фазы титана с ОЦК структурой в  $\alpha$ -фазу с ГПУ структурой. Добавка Nb понижает температуру этого превращения, однако у исследователей имеются разногласия по поводу положения межфазных границ  $\alpha/(\beta+\alpha)$  и  $\beta/(\beta+\alpha)$ . Пунктир на диаграмме – следствие сложностей в определении межфазных границ. Основная трудность связана с низкой абсолютной приведенной температурой превращения  $\beta \rightarrow (\alpha+\beta)$ , например  $T/T_m \approx 0,4$  для сплава Nb-50 масс.% Ti. Из-за этого диффузия протекает медленно и даже отжиг при 650-800  $^\circ\text{C}$  в течение нескольких сотен часов может оказаться недостаточным для достижения равновесия. Результаты компьютерных расчетов предсказывают полный распад  $\beta$ -раствора на  $(\alpha+\beta)$ , а также то, что сплавы со структурой  $\beta$ - фазы неустойчивы при комнатной и более низких температурах. Однако низкое положение границы раздела  $\beta/(\beta+\alpha)$  (на уровне  $\sim 0,4T_m$  или ниже для многих применимых на практике сплавов) позволяет охлаждать сплавы из  $\beta$ -области без выделения  $\alpha$ -фазы. Быстрым охлаждением можно подавить выделение  $\alpha$ -фазы даже в сплавах с высоким содержанием титана. Растворимость ниобия в  $\alpha$ -Ti мала и составляет 6 масс.%. Сплавы, содержащие 6-10 масс.% Nb превращаются в  $\alpha^I$ -мартенсит с ГПУ решеткой, тогда как сплавы с более высоким содержанием ниобия превращаются в орторомбический  $\alpha^{II}$ -мартенсит. В диапазоне 10-35 масс.% Nb температурная кривая мартенситного превращения носит линейный характер и может быть экстраполирована до нуля Кельвина при 43-50 масс. % Ti (т.е. для промышленных сплавов). Мартенситные фазы неустойчивы и превращаются в  $\beta$ - и  $(\alpha +\beta)$ - фазы при достаточно длительном нагреве в двухфазной области. В сплавах богатых ниобием в зависимости от скорости охлаждения конкурируют про-

цессы образования  $\alpha''$ - мартенситной фазы и метастабильной  $\omega$ - фазы, имеющей гексагональную структуру с  $c/a= 0.613$ . Она может образовываться в виде мелких эллипсоидных частиц либо при охлаждении из области  $\beta$ -фазы без изменения химического состава, либо в результате низкотемпературного старения (при 100-800 °С).

## 2. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА Nb-Ti СПЛАВОВ

Основными характеристиками, определяющими качество технических сверхпроводящих материалов, являются критическая температура ( $T_c$ ), критическое магнитное поле ( $B_c$ ) и критический ток ( $I_c$ ).

**Критическая температура.** Ряд экспериментальных данных по температуре перехода Nb-Ti сплавов в сверхпроводящее состояние представлен на рис.2. Для богатых ниобием сплавов, которые однофазны ( $\beta$ -твердый раствор),  $T_c$  достигает максимума (10.1 К) при концентрациях Nb- (17-30) масс.% Ti и понижается до 9- 9.3 К для промышленных сплавов с (44-50) масс. % Ti. С повышением содержания титана разброс результатов возрастает, и точная величина  $T_c$  зависит от состава основной фазы со структурой ОЦК после того, как произошло выделение  $\alpha$ - титана.

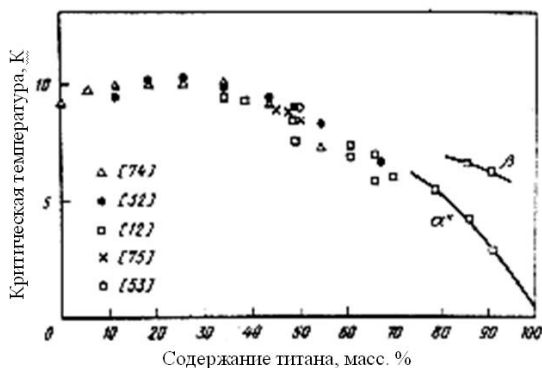


Рис.2. Зависимость критической температуры от состава сплавов Nb-Ti

В настоящее время принято определять  $T_c$ , как среднюю точку резистивного или магнитного перехода. В достаточно гомогенизи-



рованном материале ширина перехода может достигать 0,1 К даже для холоднообработанных образцов с высокой степенью деформации.

В общем случае промышленные материалы обладают неоднородностью из-за дендритной ликвации, характерной для Nb-Ti сплавов, поэтому диапазоны  $T_c$  могут быть довольно широкими.

**Верхнее критическое поле Nb-Ti сплавов.** Ниобий-титановые сплавы относятся к сверхпроводящим материалам II рода. Для них согласно теории БКШ длина когерентности меньше глубины проникновения ( $\xi < \lambda$ ). В отличие от сверхпроводников I рода в полях выше нижнего критического ( $B_{c1}$ ) магнитный поток проникает в сверхпроводник II рода, и материал приобретает вихревую структуру, содержащую как сверхпроводящие, так и нормальные зоны. Такое состояние называется смешанным, оно существует вплоть до некоторого поля  $B_{c2}$  (верхнего критического), выше которого материал становится нормальным.

Величина  $B_{c2}$  зависит от состава Nb-Ti сплава. На рис.3. приведены данные по величине  $B_{c2}$  ( $\mu_0 H_{c2}$ ) для различных сплавов системы Nb-Ti при температуре 4.2 К.

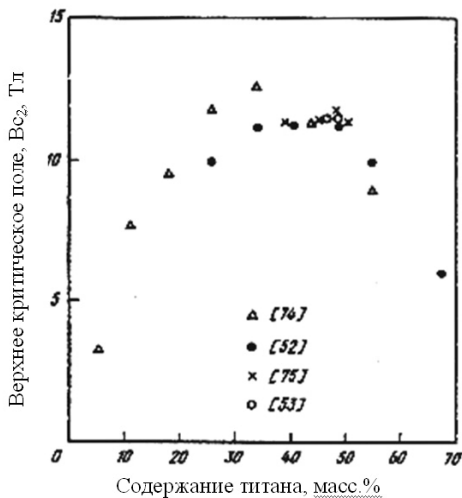


Рис.3. Зависимость верхнего критического поля от состава Nb-Ti сплавов при температуре 4.2 К по данным разных авторов

В одной из работ сообщается о величине  $B_{c2} \sim 12.6$  Тл для сплавов Nb – (25-30) масс. % Ti (рис.3), однако, общепринято, что максимальные значения  $B_{c2}$  для Nb-Ti сплавов составляют  $\sim 11$  Тл.

**Критический ток и критическая плотность тока.** С точки зрения эксплуатационных свойств достижение высоких токовых характеристик предпочтительнее, чем обеспечение высоких  $B_{c2}$ . Поэтому промышленные сверхпроводящие сплавы богаты титаном, обеспечивающим при распаде твердого раствора достаточное количество второй несверхпроводящей фазы, которая способствует повышению критической плотности тока, и сплавы Nb – (45-50) масс. % Ti более распространены, чем сплавы Nb – (25-30) масс. % Ti, имеющие более высокое значение  $B_{c2}$ .

Ниобий-титановые композитные провода в сечении представляют собой сочетание собственно волокон из сверхпроводящего сплава, стабилизирующего материала (меди, алюминия) и других элементов (диффузионных барьеров, резистивных матриц). Для многоволоконных сверхпроводников характерен постепенный переход из сверхпроводящего состояния в нормальное, так называемый резистивный переход. Форма кривой перехода и, в частности, его ширина является функцией соотношения между внутренним выделением тепла в композите и наружным охлаждением. Фиксация какой-либо точки на этом переходе в качестве критического тока  $I_c$  является произвольной, поэтому для согласования результатов разных измерений выбирается и оговаривается критерий измерения. В настоящее время принято определять критический ток, используя критерии  $E=0.1$  мкВ/см или  $\rho = 10^{-14}$  Ом.м. В ранних работах критический ток определяли по критериям  $E=1.0$  мкВ/см и даже  $E=10$  мкВ/см. Разность между значениями критического тока, определяемого по разным критериям, быстро растет с увеличением поля выше 7-8 Тл. Эта разность достигает 10-30 % в полях  $> 9$  Тл, что затрудняет сравнение результатов старых работ с современными данными.

Критический ток ( $I_c$ ) при прочих равных условиях зависит от диаметра проводника и доли сверхпроводящих волокон в его сечении. Весьма удобной характеристикой, позволяющей сравнивать степень оптимизации различных сверхпроводников, независимо от их диаметра и коэффициента заполнения (КЗ), где КЗ – доля от

площади поперечного сечения проводника, занимаемая сверхпроводящими волокнами, является критическая плотность тока ( $J_c$ ).

Критическая плотность тока – это критический ток, приходящийся на единицу площади сверхпроводника в поперечном сечении. Критическая плотность тока является структурно чувствительной характеристикой, и задача ее повышения – это одна из основных задач, решаемых разработчиками NbTi сверхпроводников. Особенности достижения заданной величины  $J_c$  в любом конкретном сплаве сложны и зависят от его состава, возможностей производства и режимов термомеханической обработки (ТМО).

Чтобы понять, каким образом различные условия приготовления сплавов влияют на величину критического тока, пользуются простой моделью пиннинга (закрепления). Эта модель основана на предположении, что металлургические неоднородности в материале на основе Nb-Ti сплава приводят к образованию областей с различными сверхпроводящими свойствами, и пиннинг происходит в отдельных областях сверхпроводника из-за наличия таких неоднородностей, как границы зерен, поля упругих напряжений, включения вторых фаз, дислокации и примеси.

Согласно представлениям, основанным на теоретических работах Ф.Лондона, Пиппарда, Абрикосова и др., магнитный поток можно представить в виде вихревой решетки из цилиндрических флюксоидов, в которых магнитный поток квантуется с определенной величиной кванта. Каждый флюксоид представляет собой нормальную сердцевину, окруженную круговым сверхтоком, необходимым для экранирования поля от окружающего сверхпроводящего материала.

В низких полях флюксоидов мало, и они находятся на значительном расстоянии друг от друга; при возрастании поля расстояния между ними сокращаются и при приближении к  $B_{c2}$  флюксоиды образуют плотную упаковку. На рис.4 схематически представлена решетка флюксоидов вблизи  $B_{c2}$ . Разбиение сверхпроводника на чередующиеся сверхпроводящие и нормальные области энергетически выгодно. В 1955г. Пиппард ввел важное понятие длины когерентности  $\xi$ , которая является областью упорядочения в сверхпроводнике или минимальным расстоянием, выше которого сверх-

проводимость может исчезнуть. Если  $\xi < \lambda$ , то смешанное состояние сохраняется (где  $\lambda$  – длина свободного пробега электрона).

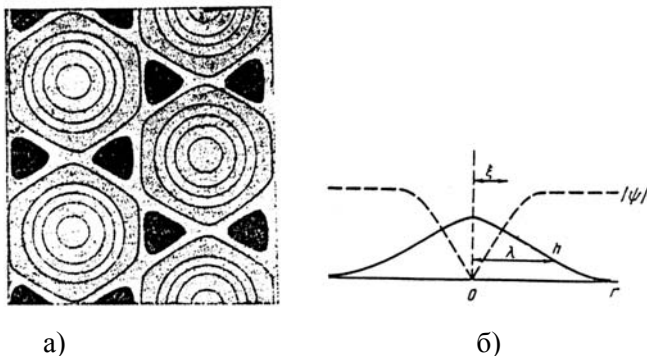


Рис.4. Треугольная вихревая решетка в сверхпроводнике второго рода вблизи  $B_{c2}$  (а) и распределение локального магнитного поля  $h$  и параметра порядка  $\psi$  вблизи изолированной вихревой нити ( $r$  – расстояние до центра нити) (б)

Согласно изложенной выше модели пиннинга для Nb-Ti сплавов с 44-48 масс. % Ti расчетная длина когерентности  $\xi$  составляет 5 нм, а диаметр флюксоида 10 нм. Отсюда вытекает, что создавая регулярную гетерогенную структуру с различными расстояниями между сверхпроводящими и несверхпроводящими областями, можно совершенствовать Nb-Ti сверхпроводники в направлении получения максимальных критических плотностей тока в различных полях (рис.5).

Исследования показали, что  $\alpha$ - выделения являются основным фактором, контролирующим критическую плотность тока в Nb-Ti сплавах. Негомогенность их распределения ограничивает достижение высокой  $J_c$ , которая имеет место только при регулярном распределении центров пиннинга. Работы по оптимизации критической плотности тока сверхпроводников на основе гомогенного Nb-Ti сплава позволили поднять критическую плотность тока до значения 2900-3200 А/мм<sup>2</sup> в поле Тл (при температуре 4.2 К;  $E=0.1$  мкВ/см).

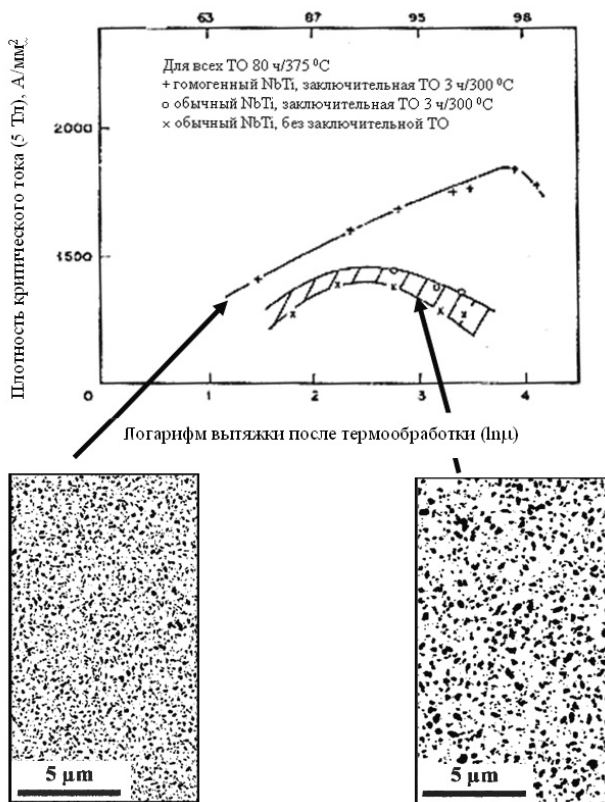


Рис.5. Изменение критической плотности тока при деформации после термообработки для двух композитов, изготовленных из сплавов, имеющих разную степень химической однородности

Рекордное значение критической плотности тока в поле 5 Тл для сверхпроводников на основе Nb-Ti сплава, получаемых с использованием диффузионного распада  $\beta$ -твердого раствора, достигнуто в лабораторных условиях в одноволоконном проводнике и составляет  $3700 A/mm^2$ .

Интенсивные электронно-микроскопические исследования микроструктуры Nb-Ti проводников с высокой критической плотностью тока позволили выявить структурные особенности и провести количественную оценку структурных параметров. Оказалось,

что основной структурной особенностью материалов с высоким значением  $J_c$  является наличие оболочек  $\alpha$ -фазы толщиной 1-3 нм, окружающих серповидные субзерна. Среднее расстояние между оболочками составляло 7-8 нм, а объемная доля  $\alpha$ -выделений по количественным оценкам была 16-17 % . На рис.6 представлена структура Nb-Ti волокна в готовом проводнике с высокой критической плотностью тока  $J_c \approx 3000$  А/мм<sup>2</sup>.



Рис.6. Структура волокна в проводнике с высокой плотностью критического тока

### 3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ Nb-Ti СПЛАВОВ

Основными этапами процесса изготовления Nb-Ti сверхпроводящих проводов являются:

- *выбор исходных материалов* – ниобия, титана и высокоэлектропроводной меди. Для изготовления сплава в качестве шихты выбирают ниобий марки НБ-1, титан марки ВТ-0. В качестве матрицы используют высокоэлектропроводную бескислородную медь. К данной меди предъявляется дополнительное требование по отношению электросопротивлений при температурах 273 и 4,2 К, называемое относительным остаточным сопротивлением и обозначаемое RRR. Значение RRR должно составлять не менее 250, что обеспечивает криогенную стабилизацию многоволоконного стренда при работе в магнитной системе;

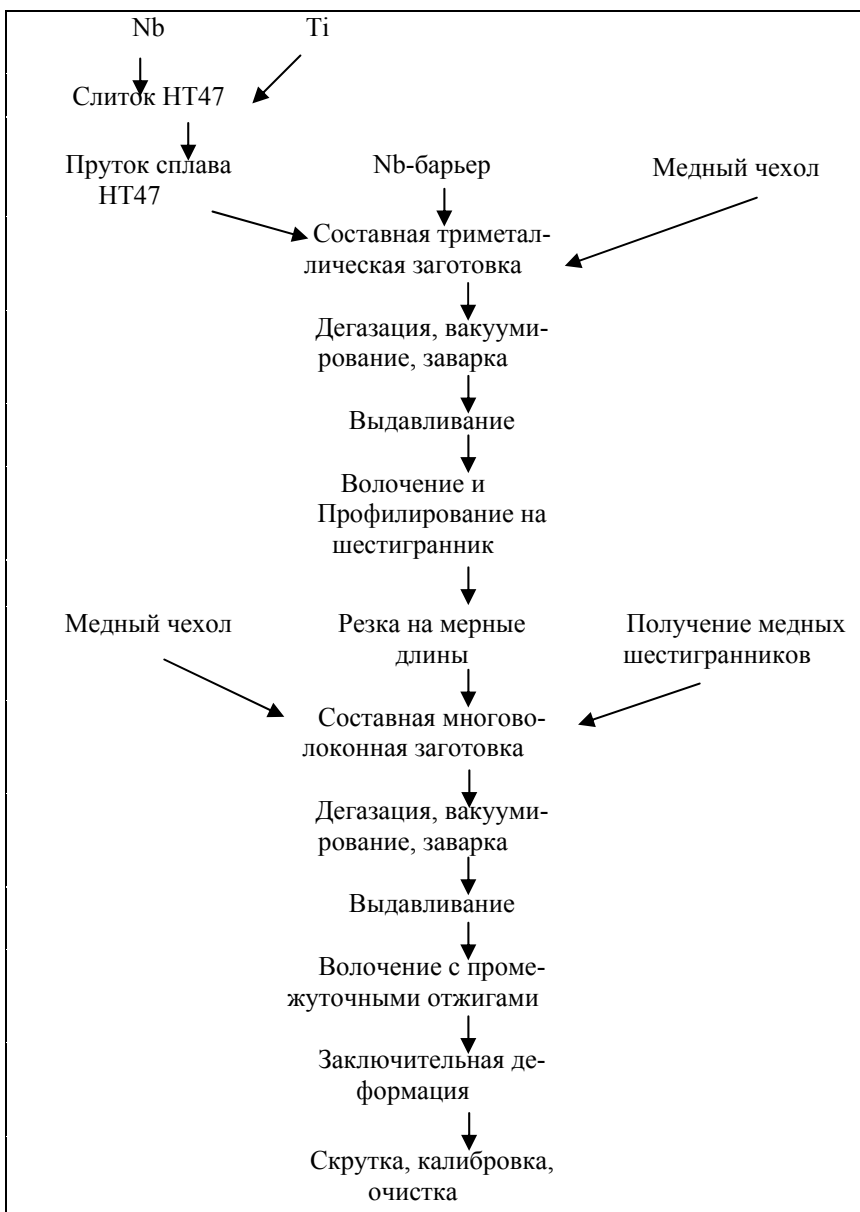


Рис.7. Принципиальная схема изготовления сверхпроводников на основе сплава Nb-47масс.% Ti (HT47) в медной матрице

- *выплавка слитков* сверхпроводящего Nb-Ti сплава методом двойного гарнисажно-дугового переплава;
- *изготовление основного элемента* для провода любой конструкции- триметаллических прутков Cu/Nb/NbTi;
- *сборка* многоволоконных композиционных заготовок и их выдавливание с получением монолитных композиционных прутков;
- *изготовление проводов* путем термомеханической обработки полученных прутков, сочетающей несколько стадий холодной деформации с промежуточными отжигами и заключительную холодную деформацию.

#### **4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КРИТИЧЕСКУЮ ПЛОТНОСТЬ ТОКА В Nb-Ti СВЕРХПРОВОДНИКАХ**

Определены пять основных технологических факторов, влияющих на критическую плотность тока в готовых Nb-Ti сверхпроводниках.

1. Обеспечение гомогенности исходного сплава (локальные изменения химического состава не более 2 масс. %).

2. Снижение степени так называемой «сосисочности» волокон, т.е. неоднородности поперечного сечения вдоль волокна с образованием участков пережимов при волочении. Это возможно путем оптимизации локального отношения Cu/NbTi и с помощью применения специальных диффузионных барьеров вокруг волокна для предотвращения образования твердых частиц Cu-Ti интерметаллидов.

3. Обеспечение большой холодной деформации до первой термообработки для предотвращения выделения вредных  $\omega$ - и  $\alpha$ -видманштеттовых частиц.

4. Использование многократных ТМО (термомеханических обработок) для выделения максимального количества  $\alpha$ - фазы (до 20-30 %).

5. Обеспечение заключительной вытяжки порядка  $\varepsilon = \ln \mu$  равной 3-5 для приведения размеров частиц  $\alpha$ - фазы и расстояний ме-



жду ними в соответствие с параметрами решетки флюксоидов для требуемого интервала полей.

Среди этих пяти факторов реже всего в литературе представлены исследования гомогенности сплавов (**первый фактор**), поскольку они тесно связаны с технологическими особенностями процессов, используемых разными изготовителями для получения сплава, и не раскрываются фирмами по коммерческим соображениям.

Цикл исследований, проведенный в США, показал, что локальная неоднородность химического состава из-за дендритной ликвации может достигать  $\pm 6$  масс. % Ti. Толщина дендрита в слитках диаметром 0.5 м составляет 100 мкм, а в лабораторных слитках весом 30 г – 10 мкм. Результатом этих работ явилась рекомендация по режимам гомогенизации структуры слитков, в зависимости от содержания Nb. На рис.8 представлена расчетная длительность термообработки при температурах 1300 и 1400°C, требуемая для сплавов, содержащих от 20 до 100 атом. % Nb.

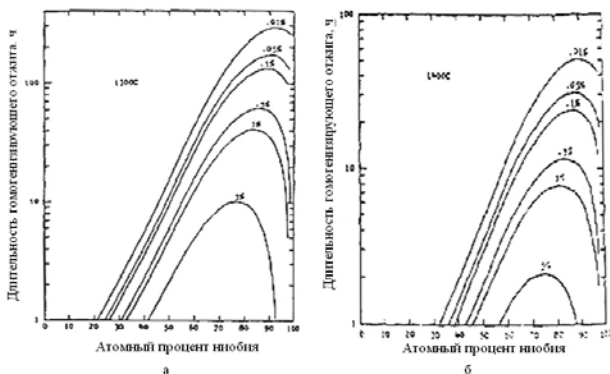


Рис.8. Расчетная длительность гомогенизирующего отжига для Nb-Ti сплавов: при температуре 1300 °С (а), при температуре 1400 °С (б)

Эти расчеты, основанные на ряде допущений, показали, что для гомогенизации реальных промышленных сплавов иногда требуется до 50 часов. Фактически же длительность гомогенизации может быть значительно сокращена за счет оптимизации процессов выплавки сплавов. Так для слитков двойного гарнисажно-дугового

переплава достаточно 8-часового отжига при 1300 °С для получения однородной структуры.

Что касается **второго фактора** – оптимизации локального отношения Cu/NbTi (или  $s/d$  – расстояния между волокнами к их диаметру) с целью уменьшения «сосисочности» волокон – то замечено, что при его уменьшении провода менее склонны к неоднородности поперечного сечения вдоль волокна. Параметр нарастания  $n$ , определяемый по крутизне вольт-амперных кривых, очень чувствителен к возникновению «сосисочности» (или, в крайнем случае, обрывности) волокон. На рис.9 приведены зависимости критической плотности тока и параметра  $n$  для двух проводников с разным отношением  $s/d$  от логарифма заключительной вытяжки. И критическая плотность тока, и параметр  $n$  для проводника с меньшим отношением  $s/d=0.24$  систематически выше, чем для проводника с  $s/d=0.36$ . Все остальные параметры проводов за исключением  $s/d$  были полностью идентичны.

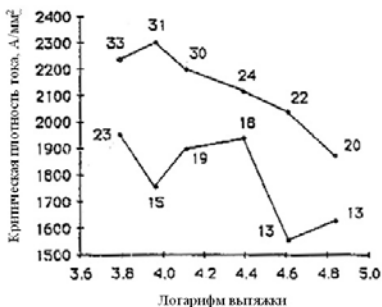


Рис.9. Зависимость критической плотности тока от заключительной вытяжки для двух композитов СВА/FerTi с отношением  $s/d = 0.24$  и  $0.36$

Однако если сверхпроводящий провод содержит в качестве матрицы высокочистую медь (так часто бывает при использовании Nb диффузионного барьера), возможно спаривание волокон за счет проникновения сверхпроводящих токов в медную матрицу ("эффект близости"), что приводит к увеличению потерь энергии в сверхпроводнике. Спаривание волокон в проводниках, содержащих матрицу из меди высокой чистоты, происходит в том случае, когда расстояние между волокнами  $d$  меньше 1 мкм. Следовательно, при выборе соотношения  $s/d$  для расчета конкретных конструкций сверхпроводников необходимо учитывать оба фактора.

Введение в конструкцию сверхпроводника ниобиевого диффузионного барьера (рис.10) также способствует уменьшению «сосисочности» волокон, так как предотвращает взаимодействие между титаном в сплаве и медью, в результате которого образуются твердые интерметаллиды Cu-Ti(Nb), способные привести к разрушению волокон и провода в целом. Взаимодействие имеет место при температурах выдавливания и термической обработки. Введение Nb барьера позволило использовать более длительные термообработки при более высоких температурах, что необходимо для обеспечения высоких плотностей критического тока. К сожалению, Nb барьер проницаем как для меди, так и для титана. Поэтому только правильный подбор толщины барьера, с учетом диффузионной подвижности Cu и Ti в зависимости от температуры и длительности термообработки, позволяет реализовать преимущества его введения.

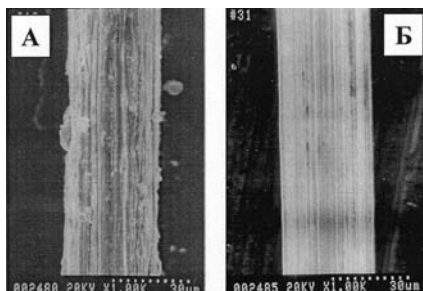


Рис.10. А – волокно без Nb барьера, Б – волокно с применением Nb барьера

При этом также следует иметь в виду, что, во-первых, Nb замещает площадь Nb-Ti сплава в сечении провода, уменьшая его токонесущую способность, и, во-вторых, Nb барьер, являясь сверхпроводником в полях ниже 0.5 Тл, увеличивает гистерезисные потери в сверхпроводнике.

**Третий фактор** – образование вредных, приводящих к обрывности проводника,  $\alpha$ - видманштеттовой и  $\omega$ - фаз, впервые был выявлен при исследовании сплавов с высоким содержанием титана. Игольчатая  $\alpha$ -фаза с видманштеттовой структурой образуется в теле субзерна в материалах с несформированной ячеистой структурой, когда плотность дислокаций внутри ячейки еще высока, т.е.

в процессе первой термообработки. При низких температурах (~350 °С) в теле субзерна может также образовываться очень мелкая эллипсовидная  $\omega$ -фаза. Обе фазы вызывают сильное увеличение твердости сплава (до 250 HV10), ухудшая его технологичность. Выделение этих фаз подавляется при увеличении степени вытяжки до первой термообработки и повышении температуры отжига. Поэтому необходимо обеспечить большую степень холодной деформации до первой термообработки.

**Четвертый фактор** – использование многократной термомеханической обработки обеспечивает поэтапное уменьшение диаметра субзерна и соответствующее увеличение количества  $\alpha$ -фазы. Значение микроструктуры холодной деформации по отношению к сверхпроводящим свойствам сплавов Nb-Ti очень велико, так как все используемые сплавы широко подвергаются холодной обработке с целью развития мелкомасштабной гетерогенной микроструктуры, которая будет эффективно осуществлять пиннинг флюксоидов. Промышленное производство длинномерного композитного провода достигается волочением сплава в однофазном  $\beta$ -состоянии. С помощью волочения можно получить развитую структуру микрополос скольжения (рис.11), а последующая низкотемпературная обработка такой холоднодеформированной структуры вызывает очень тонкие выделения  $\alpha$ -Ti. Такая структура будет ячеистой и  $\alpha$ -Ti будет выделяться в стенках ячеек.

На рис.12 приведен график, показывающий взаимосвязь критической плотности тока с режимами ТМО.

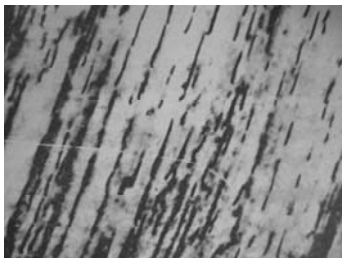


Рис.11. Микроструктура полос скольжения в Nb-Ti сплаве после соответствующей механической обработки

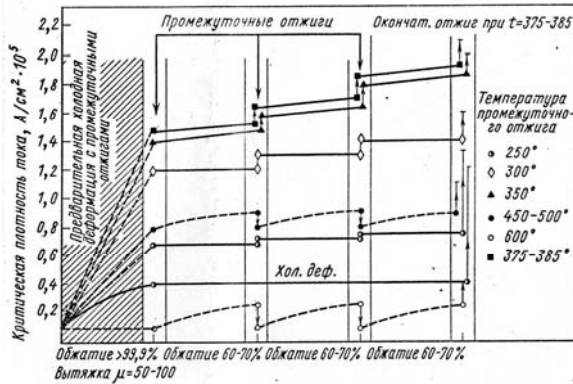


Рис.12. Многократная ТМО

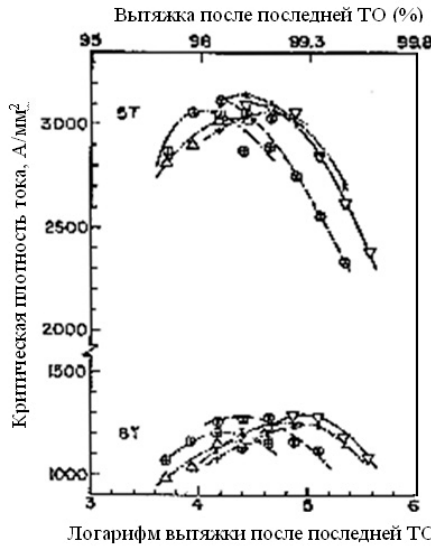


Рис.13. Зависимость критической плотности тока от заключительной вытяжки

Влияние **пятого фактора** – заключительной деформации – продемонстрировано на рис.13. В выпускаемых в производстве сверхпроводниках критическая плотность тока растет с увеличением заключительной вытяжки до тех пор, пока преимущества измельчения микроструктуры (для лучшего соответствия параметрам пиннинга) не подавляются развитием «сосисочности» волокон

(обычно в качественных композитах при  $\varepsilon = \ln \mu > 5$ ). В максимальной оптимизации этих факторов заключается повышение критической плотности тока и обеспечение стабильности характеристик технических Nb-Ti сверхпроводников.

## **5. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К Nb-Ti СПЛАВАМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Учитывая вышеизложенное, очевидно, что, в первую очередь, качество технических сверхпроводящих материалов зависит от качества исходного сверхпроводящего сплава Nb-Ti, т. е. от его химического состава, однородности и пластичности. Если рассматривать Nb-Ti сплав как сплав на основе титана, легированный ниобием (см.рис.13), то добавка Nb понижает температуру полиморфного превращения титана  $\beta \rightarrow \alpha$ , и, следовательно, увеличивает устойчивость  $\beta$ -фазы.

Примеси, контролируемые в спецификациях, с точки зрения влияния на полиморфное превращение являются стабилизаторами либо  $\alpha$ -фазы, либо  $\beta$ -фазы. На рис. 14 представлен обобщенный график, классифицирующий легирующие элементы в титановых сплавах по их влиянию на полиморфное превращение. Примеси азота, кислорода, углерода и алюминия являются стабилизаторами  $\alpha$ -фазы, т. е. повышают температуру полиморфного превращения, способствуют образованию и росту  $\alpha$ -выделений и препятствуют их растворению.  $\alpha$ -стабилизаторы потенциально повышают критическую плотность тока в сплавах, но, к сожалению, резко снижают технологичность проводов. Кислород сильнее всех остальных примесей способствует увеличению твердости и критической плотности тока, за ним следуют азот и углерод. Предельные содержания примесей O,C,N в спецификациях не связаны с ролью стабилизаторов  $\alpha$ -фазы, а в большей степени вызваны желанием повысить пластичность проводов.

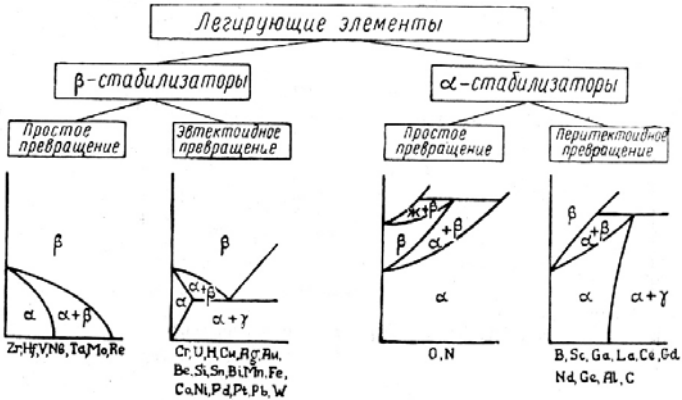


Рис.14. Классификация диаграмм состояния титановых сплавов

Примеси железа, никеля, хрома, кремния, меди и тантала являются стабилизаторами β-фазы, так как снижают температуру аллотропического превращения. Однако поскольку содержание этих примесей в промышленных сплавах низко, они не оказывают существенного влияния на фазовый распад. Результаты ряда работ показывают, что увеличение содержания Та до 0.25 масс. % и даже до 2 масс. % не влияет ни на критическую плотность тока, ни на технологичность, однако снижает стоимость сплава из-за отсутствия необходимости очистки сплава от тантала. Увеличение содержания железа (Al, Cu) до 0.05 масс.% не ухудшает ни технологичности, ни сверхпроводящих характеристик сплава. Отмечено также благоприятное влияние Fe на критическую плотность тока проводов в полях выше 9 Тл.

Необходимым условием для получения высококачественных проводов являются высокие механические характеристики сплава и, в первую очередь, его пластичность. Повышения пластичности материала можно достичь за счёт предварительной деформации слитка с последующим рекристаллизационным отжигом перед закладкой Nb-Ti заготовки в сборку. Цель такого процесса – создание в Nb-Ti заготовке равномерной мелкозернистой структуры.

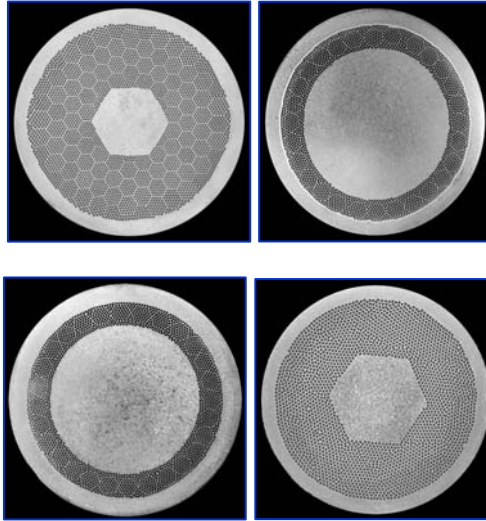
## 6. СПОСОБЫ СБОРКИ СОСТАВНЫХ ЗАГОТОВОК

Известные методы сборки составных заготовок включают однократную, двукратную и трехкратную сборки. Независимо от предполагаемого способа изготовления проводника первую многоволоконную составную заготовку собирают либо из биметаллических Cu/NbTi (или триметаллических Cu/Nb/NbTi) элементов, либо раздельно из медных трубок и ниобий-титановых стержней. Биметаллические (триметаллические) элементы и медные трубки могут быть круглого и шестигранного сечения, однако предпочтение отдают шестигранным элементам, поскольку сборка круглых обычно вносит значительное количество нежелательных пустот. Избыток пустот может привести к искажению геометрии сборки и даже к разрушению ее оболочки во время изостатического прессования (обжатия). Искажение сборки, вызываемое смещением групп элементов друг относительно друга, характерно для круглых элементов. Вид поперечных сечений проводников, изготовленных из сборок с элементами круглого профиля, выявляет многочисленные области, в которых нарушается геометрический порядок расположения и профиль волокон. Гексагональные элементы эффективно замыкаются и образуют монолитную массу, обжатие которой не приводит к активному смещению волокон из своих положений.

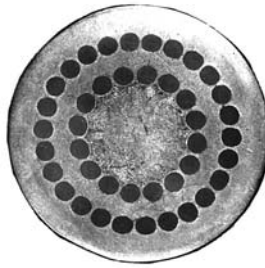


Рис. 15. Сборка составных заготовок





а



б

Рис16. Сверхпроводники на основе Nb-Ti для различных полоидальных обмоток ИТЭР (а), СКНТ 0.82-42-0.25 для томографов (б)

При компенсации большого количества пустот за счет обжатия следует учитывать возможность уменьшения исходного размера заготовки и, как следствие, уменьшение общей вытяжки при волочении, что, в свою очередь, не позволит получить расчетный диаметр волокон при требуемом диаметре провода. Заполнение пустот между элементами круглого сечения изменит расчетное соотношение меди и сверхпроводника.

Таким образом, при сборке составных заготовок любой кратности целесообразно использовать элементы шестигранного сечения. Однократная сборка позволяет наиболее экономичным способом изготовить высококачественные сверхпроводники (рис.15).

Используя сборку биметаллических (триметаллических) шестигранных прутков, можно конструировать проводники с числом волокон от нескольких штук до нескольких десятков тысяч (рис.16). При необходимости изготовления проводов с большим числом ниобий-титановых волокон используют двукратную и трехкратную сборки. Существенным недостатком этих методов является высокая стоимость и более низкое качество проводов по сравнению с проводами, полученными из однократной сборки.

## **7. ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Со времени открытия сверхпроводимости усилия физиков и инженеров были направлены на поиски различных вариантов технического использования этого поразительного явления. До шестидесятых годов прошлого века сверхпроводники и сверхпроводимость были объектами только физического исследования. Проблема практического использования сверхпроводников относилась к области научной фантастики. Огромные возможности, которые открывает перед техникой использование сверхпроводящих магнитных систем, стимулируют проведение исследований во всевозрастающем объеме.

Однако только после развития техники низких температур, появления теоретических работ, объяснивших природу сверхпроводящего состояния, и, конечно, после создания сверхпроводящих материалов с высокими критическими свойствами сверхпроводимость начала выходить на дорогу практического применения. Для одних отраслей науки и техники применение сверхпроводников позволяет улучшить характеристики приборов, для других является единственным приемлемым решением, например в космических и транспортных аппаратах, термоядерных реакторах и МГД-генераторах. Важными сферами применения сверхпроводников может быть их использование в физике высоких энергий, плазмы, термоядерных реакций, МГД-генераторах, при передаче электроэнергии на большие расстояния, в различных приборах электрон-

ной, измерительной и вычислительной техники, особенно для медицинской диагностики. Примеры использования сверхпроводников можно условно разделить на три группы:

- для получения сильных магнитных полей;
- для кабелей электропередач;
- для электроники.

### **7.1. Применение сильноточных сверхпроводников**

В основном два уникальных свойства сверхпроводников лежат в основе их сильноточных применений:

в интервале значений, ниже критических величин температуры, индукции магнитного поля и плотности электрического тока, сверхпроводники имеют нулевое сопротивление и способны нести ток без потерь на нагрев проводника;

при значениях магнитного поля ниже так называемого мейснеровского сверхпроводники обладают идеальным диамагнетизмом.

Сильноточные технологии разрабатываются для создания устройств больших мощностей и запасенных энергий. Сильноточные сверхпроводники применяются для создания, в первую очередь, высоких магнитных полей, поскольку для поддержания в сверхпроводящем соленоиде уже созданного поля не требуется затрат электрической мощности. Энергия не теряется и может быть использована в случае надобности снова. Этот принцип используется и при создании накопителей энергии.

Соленоиды из меди имеют проблему прочности. В поле с индукцией 100 Тл магнитные усилия эквивалентны усилиям в жерле пушки при выстреле! Поэтому требуется усиливающая обмотка из медных сплавов повышенной прочности. Другая проблема – большой расход хладагента.

У сверхпроводящих соленоидов эти проблемы решаются, так как они легче и меньше по размерам – они требуют меньшего расхода хладагента. Для сравнения – при индукции магнитного поля 10-15 Тл сверхпроводящий магнит весит всего несколько десятков килограммов, занимает площадь несколько квадратных метров и расходует около 10 л жидкого He в сутки. И это вместо нескольких десятков тонн и тысяч киловатт электроэнергии, которые потребовались бы для несверхпроводящего магнита.

Естественно, что первой областью применения сверхпроводимости явилась физика твердого тела и физика высоких энергий. Магнитные поля применяются практически во всех областях физики.

**Сверхмагниты**, создающие в малых объемах сильное и очень однородное магнитное поле, нужны при изучении твердого тела. Сильное магнитное поле резко заворачивает траектории электронов, летящих в толще образца. Измерение частоты колебания этого движения позволяет определить эффективную массу электронов, длину свободного пробега между двумя соударениями, концентрацию частиц. Становится также возможным сознательно вводить центры рассеяния электронов и изучать влияние этих центров на электронную систему.

**Физика высоких энергий** – это не только создание магнитных систем ускорителей, а также и каналов транспортировки и сепарации пучков, разнообразных детектирующих систем. Сильные магнитные поля, создаваемые сверхпроводящими магнитами, нужны и для управления пучками частиц на выходе из ускорителя.

Современные ускорители, сообщаемые частицам высокие энергии (десятки и сотни гигаэлектронвольт), имеют вид больших колец и состоят их секторных магнитов. Ускорители – это очень сложные и дорогостоящие сооружения. В нашей стране был построен под Серпуховом крупнейший протонный ускоритель, который имеет диаметр 0,5 км, его длина 1,5 км, он состоит из 120 массивных блоков весом 20 тысяч тонн и способен набирать до 76 ГэВ энергии. (В Дубне работают небольшие ускорители на основе ниобий-титанового сплава НТ-50.)

Создана установка «Гиперон-1» для исследования частиц с малым временем жизни; диаметр рабочей области 1 м, индукция магнитного поля достигает 5 Тл. Обмотка из сверхпроводников на основе ниобий-титанового сплава НТ-50 имеет вес 8 т, его криогенная установка потребляет только сотую часть энергии, которую потреблял бы в обычном использовании аналогичный несверхпроводящий магнит.

Создание магнитов для Большого адронного коллайдера (ЛНС) является в настоящее время самым масштабным использованием сверхпроводников, поскольку для этого потребуется изготовить ~ 1400 тонн проводника, в котором ~ 400 тонн приходится на Nb-Ti

сплав. Экспериментальные провода диаметром 1,065 мм с диаметром волокон 12 мкм были изготовлены в рамках исследовательской программы LHC – Большого адронного коллайдера, который будет работать при температуре сверхтекучего гелия (1,9 К).

**ИТЭР, Токамаки.** Энергетика является важной и перспективной областью применения сверхпроводников. Потребление энергии растет неуклонно, а в условиях ограниченности используемого природного топлива – нефти, газа, угля – встает вопрос о новых источниках энергии, одним из которых может стать термоядерный синтез. Электростанция на термоядерной энергии – это революция, сравнимая с изобретением паровой машины и компьютера. Все без исключения серьезные специалисты считают, что лишь использование термоядерной энергии способно решить энергетические проблемы цивилизации. В отличие от газа и угля он не исчерпаем, в отличие от атомной энергии – безопасен. В отличие от нетрадиционных источников – эффективен для промышленного освоения.

Одной из наиболее острых и важных проблем при использовании термоядерного синтеза является осуществление управляемой термоядерной реакции. Успешные решения этой задачи обещает человечеству неисчерпаемые источники энергии. Принцип действия термоядерного реактора имеет много общего с обычным атомным реактором (см.рис.16) Различие состоит в том, что термоядерная реакция – есть реакция синтеза (соединения) легких ядер в более тяжелые, а не их деления: например синтез ядер гелия из ядер дейтерия – тяжелого водорода. Из дейтерия, содержащегося в 1 л воды, можно получить такую же энергию, как при сгорании 350 л бензина.

Такой синтез осуществлен при взрыве водородных бомб, но эта реакция неуправляема. Для осуществления управляемого синтеза необходимо разогнать ядра легких атомов до таких скоростей, чтобы при столкновении они не разлетались. Для этого надо иметь очень высокую температуру – в десятки миллионов градусов. Когда любое вещество находится в состоянии плазмы, атомы теряют электронные оболочки и образуется бурлящая смесь положительно заряженных частиц. Такую плазму можно удержать только магнитным полем. Эти поля так велики, что их можно создать только с помощью сверхпроводящих магнитов. На установках типа Токамак

удалось осуществить удержание плазмы при температуре 80 млн. град при высокой плотности до  $10^{15}$  частиц в  $1 \text{ см}^3$  (рис.18).

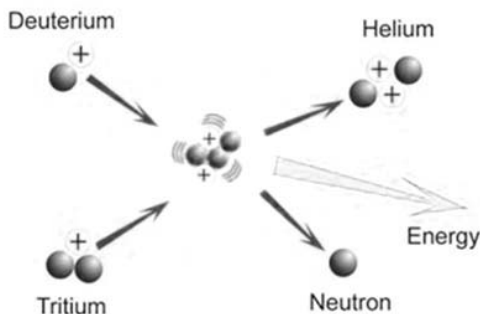


Рис.17. Схематичное изображение термоядерной реакции

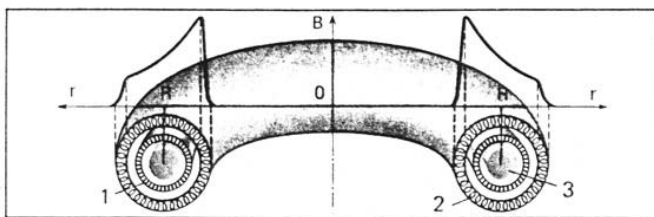


Рис.18. Распределение тороидального магнитного поля в поперечном сечении Токамака: 1 – стенка рабочей камеры; 2 – обмотка; 3 – плазма

Наибольшего значения магнитная индукция достигает на обмотках с внутренней стороны тора, поскольку здесь плотность тока (число витков на единицу площади) максимальна. Внутри обмоток поле изменяется сравнительно медленно (по закону  $1/r$ ), а снаружи резко падает.

Токамак по принципу действия можно сравнить с большим трансформатором. К его первичной обмотке проводится электропитание из сети. Вторичной обмоткой служит замкнутая тороидальная вакуумная камера, заполняемая водородом или его тяжелыми изотопами. При пропускании через первичную обмотку переменного тока в камере возникает вихревое поле, которое ионизирует рабочий газ. Наведенный в этом газе, как в проводнике сильный ток (в сотни тысяч ампер) образует плазму и нагревает ее до высоких температур. Сильное магнитное поле вторичного тока и

продольное поле, созданное специальной катушкой, удерживает плазменный шнур, не дает ему рассыпаться и упасть на стенки камеры. Во всем мире созданы уже более 300 Токамаков. В России в активном состоянии было три: один в Петербургском физико-техническом институте и два в Москве в Курчатовском институте (Т-7 – на основе сплава Nb-Ti и Т-15 на основе интерметаллического соединения Nb<sub>3</sub>Sn). Т-15 и до настоящего времени является самой крупной в мире сверхпроводящей магнитной системой, которая предназначена для демонстрации термоядерной реакции. Для его магнитной системы по промышленной технологии в СССР было выпущено более 300 токнесущих элементов общей длиной 100 км и массой около 120 тонн.

Примерно такой же принцип использован в катушках тороидального поля магнитной системы ИТЭР (рис.19). Необходимость создания реактора ИТЭР, основанного на синтезе ядер, с практической точки зрения понятна и оправдана. ИТЭР станет самой крупной в мире термоядерной установкой, которая продемонстрирует научную и техническую осуществимость использования термоядерной энергии в мирных целях.

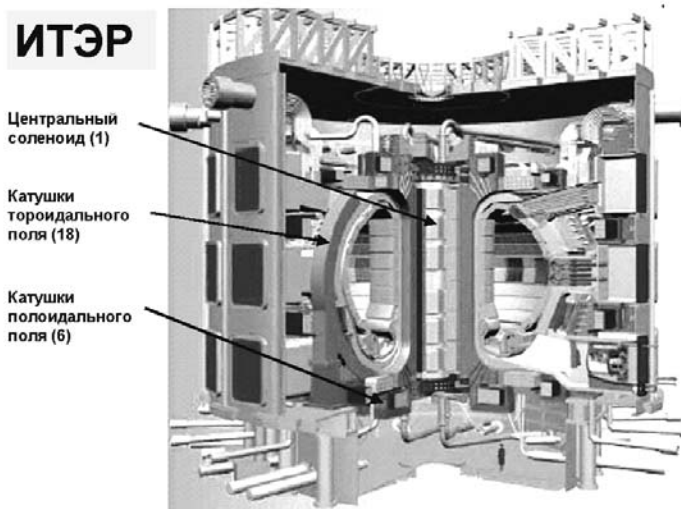


Рис.19. Схема ИТЭР

**Накопители.** Электроэнергию выгодно производить непрерывно, но спрос на неё в разное время суток разный. За последнее десятилетие во всем мире произошло около двух десятков серьезных аварий в электросетях, которые повлекли довольно длительное отключение электроэнергии. Это было и в Нью-Йорке (1999г), и в Лондоне (2003г), и в Москве (2005г) (рис.20).

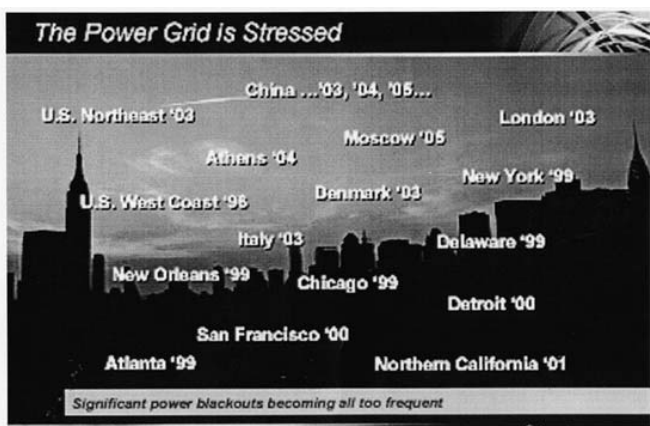


Рис.20. Крупнейшие аварии в энергосетях

Стало очевидно, что необходим склад энергии. Эту проблему можно решить с помощью сверхпроводников. Сверхпроводящие индуктивные накопители электромагнитной энергии представляют собой пример одного из уникальных технических использований явления сверхпроводимости – это большая катушка, замкнутая на себя, где без потерь циркулирует ток. СПИНЭ – индуктивные накопители энергии имеют ряд неоспоримых преимуществ:

плотность энергии в нем на два порядка больше, чем в конденсаторной батарее, а отдаваемые импульсные мощности могут достигать величин в десятки миллионов киловатт;

высокий уровень КПД и быстродействие. Время вывода энергии из сверхпроводящего накопителя зависит от его конструкции и составляет от тысячных долей секунды до нескольких часов;

возможность размещения вблизи потребителя энергии бесперебойного снабжения электроэнергией при аварийных ситуациях;

низкий уровень потерь при хранении энергии;



возможность регулирования в режиме вывода энергии и возможность аккумулирования электроэнергии для выравнивания графиков нагрузки.

В ближайшие 5-10 лет СПИНЭ будут использовать НТСП-технологии. В США действуют десятки небольших накопителей, в Японии инженерные испытания СПИНЭ на 10,5 МДж завершены (рис.21) в 2003 г. и разрабатываются два устройства на 54 МДж и 1,8 ГДж. В Европе существует финансируемая программа создания СПИНЭ на основе ВТСП.

У нас пока есть только модельные системы, например «СПИН-2»: при запасенной энергии приблизительно 1,5 МДж, силе тока около 10 кА, напряжении вывода около 50 кВ и времени вывода энергии 0,005 с обеспечивает мощность примерно 500 тысяч кВт.

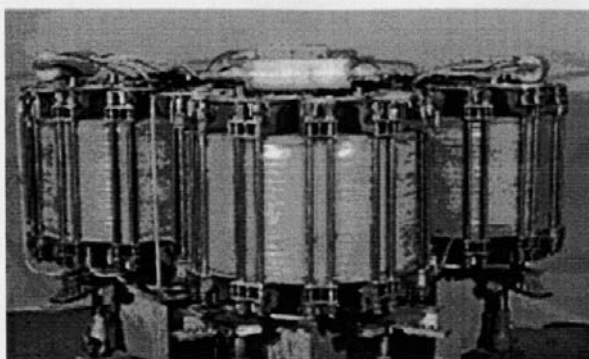


Рис.21. СПИНЭ на 10,5 МДж (Япония)

С точки зрения практического применения интерес представляют СПИНЭ:

- с запасенной энергией  $10^6$ - $10^7$  Дж, обеспечивающие эффективное регулирование напряжений в «слабых» электрических сетях и повышение уровня защиты потребителей электроэнергии;

- с запасенной энергией  $10^8$ - $10^9$  Дж, позволяющие достаточно быстро влиять на распределение мощности в системе и обеспечивать бесперебойное снабжение электроэнергией потребителей при аварийных ситуациях в ЕНЭС;

- в перспективе, при запасенной энергии  $10^{12}$ - $10^{13}$  Дж, позволяющие аккумулирование электроэнергии для выравнивания графиков нагрузок.

**Кабели передачи энергии.** Наиболее заманчивой является возможность использования сверхпроводников для линий электропередач. Известно, что несмотря на все ухищрения сетевых компаний РАО ЕЭС, не менее 10 % производимой в стране электроэнергии пропадает зря. В пересчете на год теряются миллиарды рублей. А все дело в том, что часть энергии безвозвратно уходит на нагрев проводов протяженных линий электропередачи и окружающего пространства. Впрочем, аналогичная картина наблюдается во всем мире. Физику не обманешь. Техничко-экономический анализ показал, что при большой мощности сверхпроводящий кабель будет в 2-3 раза дешевле обычного, а потери энергии в нем будут сокращены в 25 раз. Сам по себе сверхпроводящий материал намного дороже меди, однако токонесущая жила оказывается дешевле, ведь по проводу сечением  $1 \text{ мм}^2$  можно пропускать не 1-2 А, а десятки килоампер. Сэкономленную на токовой жиле сумму можно потратить на криогенное охлаждение. Однако в кабелях переменного тока некоторая часть энергии все же теряется. Дело в том, что при протекании переменного тока в сверхпроводящем кабеле появляется электрическое сопротивление. Обусловлено оно воздействием переменного тока на неспаренные электроны в сверхпроводнике. В течение одного полупериода тока их скорость нарастает от нуля до максимума и снова падает до нуля, а затем ток меняет свое направление на противоположное, и все повторяется снова. Возникающее сопротивление, хотя оно и мало по сравнению с сопротивлением металла в нормальном состоянии, все же приводит к выделению тепла, и кабель нужно охлаждать. Основная трудность при прокладке кабеля – тепловая защита. Можно создать вакуумную изоляцию в многослойной трубе (рис.22).



Рис.22. Конструкция типового ВТСП кабеля

Кабель представляет собой длинный криостат. Однако следует учесть, что процесс изготовления сверхпроводящего кабеля достаточно трудоемок. Ясно, что существуют много и других трудностей, но у нас в стране уже создан кусок кабеля длиной 50 м на основе  $Nb_3Sn$  на 8 и 10 кА. Кабели на 5 ГВт испытываются в США и Японии.

Проекты сверхпроводниковых линий электропередач (СЛЭП) на основе НТСП создавались еще в 80-е годы XX в. в СССР, США и ряде других стран. В настоящее время такие проекты направлены на использование ВТСП материалов. Например, в Курчатовском научном центре рассматривается проект линии электропередачи из нашей страны в Японию, кабель на основе ВТСП будет проложен по дну Тихого океана.

**МГД-генераторы.** Магнетогидродинамические генераторы предназначены для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Рассмотрим принцип их работы.

Известно, что при движении в магнитном поле в проводнике возбуждается электродвижущая сила – ЭДС. Если концы проводника замкнуть на какую-либо нагрузку, то в цепи пойдет ток. Именно на этом принципе электромагнитной индукции, открытой Фарадеем более 150 лет назад, и работают все генераторы электрического тока, преобразующие механическую энергию в электрическую.

В обычном генераторе ротор вращается, магнитный поток пересекает обмотку и в ней возбуждается электрический ток. В МГД-

генераторе нет вращающихся частей. Проводником, пересекающим магнитное поле, является низкотемпературная плазма – газ, нагретый до температуры 2500 °С и содержащий добавки легкоионизирующихся веществ (для повышения электропроводности). Когда такой газ с достаточно большой скоростью проходит в специальном канале через сильное магнитное поле, возникает ЭДС. Если электроды, соответствующим образом расположенные вдоль плазменного канала, соединить с нагрузкой, то ЭДС создает ток в направлении, перпендикулярном движению газа и силовым линиям магнитного поля, способный совершать работу. Такой плазменный ускоритель аналогичен обычному электродвигателю, в котором роль якоря играет плазма.

В МГД-генераторе движение газа осуществляется за счет собственного расширения, т.е. без применения какого-либо двигателя. В канале МГД-генератора вообще нет движущихся частей, и поэтому материал, из которого сделаны наиболее ответственные элементы, не испытывает сколько-нибудь значительных механических усилий. В этом состоит одно из важных преимуществ преобразования энергии с помощью МГД-генератора. Перед разработчиками этих генераторов стоит та же нелегкая проблема, что и перед создателями термоядерного реактора: как получить сильные магнитные поля? Постоянные и очень сильные магнитные поля нужны для того, чтобы за малое время пролета частиц по каналу успеть «прибить» их к тому или иному электроду.

В МГД-электростанциях будущего, так же как и в термоядерных реакторах, необходимо использовать сверхпроводящие магнитные системы. В противном случае большая часть энергии будет уходить на собственные нужды МГД-генератора.

Магнитная система для наиболее распространенного типа МГД-генератора, так называемого линейного генератора, подобна отклоняющему магниту, используемому в ускорительной технике. Но размеры магнитной системы крупной МГД-электростанции должны быть значительно больше создаваемых для любых иных целей. Так, у МГД-генератора мощностью порядка 500 МВт сечение канала, в котором создается поле, будет составлять несколько квадратных метров при длине более 10 м, запасенная в магнитном поле энергия может превышать  $10^{10}$  Дж.

**Транспорт на магнитной подушке.** Если сверхпроводящий диск опустить на сверхпроводящую катушку, в которой течет неза-  
тухающий ток, то благодаря диамагнетизму сверхпроводников диск будет парить над катушкой. Это явление называется магнит-  
ной левитацией. На этом принципе можно создавать различные  
устройства, которые позволяют обеспечить устойчивую подвеску в  
одном, двух или трех направлениях. Подобные магнитные подвесы  
особенно удобны в тех случаях, когда тело, подвешенное в магнит-  
ном поле, должно вращаться с большим числом оборотов. Таким  
образом, можно получать подшипники, практически не обладаю-  
щие трением. Вплоть до максимальных скоростей вращения верх-  
ний предел числа оборотов ограничивается механической прочно-  
стью материала.

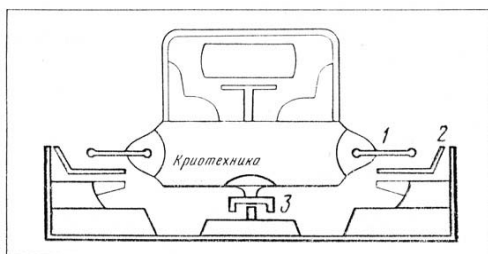


Рис.23. Схема поезда с магнитной подвеской: 1 – сверхпроводящий электро-  
магнит (охлаждение He); 2, 3 – полосы-рельсы (Al)

В связи с этим очень привлекательной является идея платформы  
с магнитной подвеской. Схема его устройства представлена на  
рис.23. В днище скоростного вагона поезда расположена сверхпро-  
водящая обмотка возбуждения, криогенное хозяйство, металличе-  
ские экраны для защиты пассажиров от мощных магнитных полей.  
Вдоль всего пути уложены в горизонтальной и вертикальной плос-  
костях замкнутые контуры из толстых алюминиевых полос, ста-  
торные проводники располагаются вдоль эстакады, ротором будет  
сам поезд. Вдоль пути побежит магнитная волна, которая как бы  
потянет за собой вагоны. Очень важно, что энергия будет переда-  
ваться бесконтактным путем. Такие поезда уже созданы в Японии,  
Китае, Германии. Например, в Японии между Токио и Осака был  
проложен участок дороги длиной 500 км для поезда с применением

сверхпроводящих материалов. В июле 2000 г. у подножия горы Фудзияма проходил испытания поезд на магнитной подушке, способный разогнаться до скорости более 500 км/ч. Последний рекорд скорости, установленный этим поездом, – 552 км/ч. Японский «летун» сначала движется на колесах. Когда его скорость достигает 130 км/ч, колеса втягиваются в корпус, как у самолета. К тому моменту, когда поезд разгоняется до 160 км/ч, трение между колесами и рельсами исчезает, и поезд плывет в воздухе на высоте приблизительно 10 см над путями. Никакой вибрации не ощущается, так, что в салоне нет даже ремней безопасности. По словам пассажиров поезда, по вагону можно спокойно ходить (во всяком случае, вскоре после того, как исчезнут стартовые перегрузки). В 2002 г. в Китае завершилось строительство первой в мире транспортной системы на магнитной подушке. Она связала центр Шанхая с международным аэропортом Пудон. Строительство дороги протяженностью 30 км потребовало вложений в объеме 1 млрд.долл. США. Поезд на магнитной подушке может развивать скорость до 430 км/ч.

**Медицина, ЯМР-томографы.** В 2003 году за изобретение метода магнитно-резонансной томографии, на основе открытия Реймонда Дамадьана, Нобелевскую премию по физиологии и медицине получили Питер Мэнсфилд и Пол Лотербур.

Магнитно-резонансная томография – это метод исследования внутренних органов и тканей с использованием физического явления ядерного магнитного резонанса. Метод основан на измерении электромагнитного отклика ядер атомов водорода на возбуждение их определенной комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряженности.

Метод магнитно-ядерного резонанса позволяет изучать организм человека на основе деления и насыщенности тканей организма водородом. Ядро водорода состоит из одного протона, что позволяет отслеживать положение атомов водорода в мощном магнитном поле. На основе анализа параметров протона (спинов) и их векторного направления, которые могут находиться только в двух противоположных фазах, а также их привязанности к магнитному моменту протона можно установить, в каких именно тканях находится тот или иной атом водорода.

Если поместить протон во внешнее магнитное поле, то его магнитный момент будет либо сонаправлен, либо противоположно

направлен магнитному моменту поля, причём во втором случае его энергия будет выше. При воздействии на исследуемую область электромагнитным излучением определённой частоты все протоны меняют свой магнитный момент на противоположный, а потом вернутся в исходное положение. При этом томографом регистрируется резонансное поглощение энергии.

Томографы должны содержать источник сильного, а главное стабильного магнитного поля.

Для применения в ЯМР-томографах по требованиям фирмы «Тошиба» разработана специальная конструкция сверхпроводника (марка СКНТ 0.82-42-0.25), на которую получен патент. Проводник имеет следующие параметры: отношение  $Cu:NbTi$  от 3:1 до 8:1, диаметр волокна 25-60 мкм. В зависимости от требований изготовителей магнитной системы сверхпроводники для томографов обеспечивают уровень критического тока в интервале 700-2000 А (в поле 2 Тл; 4.2 К).

На рис. 24 представлен ЯМР-томограф фирмы Signa 1.5 Т, в котором создана MR/i – высокоскоростная система для сканирования всего тела, работающая при индукции 1,5 Тл. Магнит разработан так, что бы пациент чувствовал себя спокойно и комфортно, при этом сохраняется клиническая точность обследования, высокая разрешающая способность и высокое соотношение сигнал/шум. Система использует современную технологию криогенного охлаждения К4.



Рис.24. Общий вид установки для ЯМР-томографии

Специфика применения сверхпроводящих магнитов для исследования с помощью ЯМР состоит в том, что необходимо иметь в пространстве чрезвычайно однородное поле с индукцией от 1 до 10 Тл (обычные магниты могут достичь только до 2 Тл). Ядерный магнетизм наблюдать трудно из-за малости магнитного момента. Резонансным методом с помощью сверхпроводящих магнитов это становится возможным благодаря их способности работать в режиме замороженного поля, поскольку при использовании сверхпроводящих магнитов в сверхпроводящей цепи существует не меняющийся во времени электрический ток. В настоящее время в мире не только разработаны, производятся и используются ЯМР-томографы для медицинской диагностики, но и имеется реальный рынок СП-магниторезонансных томографов с объемом продаж более 2 млрд. долларов. В России в начале девяностых годов прошлого века была запущена государственная программа по производству томографов для медицинской диагностики, но из-за недостаточного финансирования программа была свернута, а медицинские учреждения продолжили поштучную закупку зарубежных приборов.

## **7.2. Слаботочные сверхпроводниковые технологии**

Понятно, что уникальные электрические и магнитные свойства сверхпроводников позволяют использовать сверхпроводимость и в технике специальных физических измерений. Еще на ранней стадии развития теории сверхпроводимости были построены сверхпроводящие гальванометры, которые благодаря чрезвычайно малому внутреннему сопротивлению обладают довольно высокой чувствительностью к напряжениям (около  $10^{-11}$  В). Резкая температурная зависимость электрического сопротивления при переходе из нормального в сверхпроводящее состояние позволяет создать высокочувствительные сверхпроводящие приемники теплового излучения (болометры). Значительные достижения связаны также с использованием двух явлений: квантования потока и эффектом Джозефсона (протекание сверхпроводящего тока через тонкие изолирующие слои). С их помощью сразу удалось повысить точность измерений магнитных полей больше чем на четыре порядка, что произвело буквально переворот в этой области. Тем самым была



открыта для изучения магнитных свойств материи новая область, от которой уже были получены и еще можно ожидать множества весьма важных результатов.

**Сверхпроводящие переключатели-криотроны, запоминающие устройства.** Фазовый переход из сверхпроводящего состояния в нормальное можно стимулировать с помощью внешнего магнитного поля. Поскольку это превращение сопровождается изменением электрического сопротивления, то таким путем можно управлять и силой электрического тока. Принципиальная возможность использования сверхпроводимости для создания переключающих элементов известна довольно давно. Их интенсивно начали использовать еще в пору создания больших электронно-вычислительных машин. Тогда и появилось само название «криотрон». Особое достоинство криотронов состоит в том, что их можно легко сочетать со сверхпроводящими запоминающими элементами, которые, в свою очередь, отличаются крайне малым выделением мощности. При растущем объеме памяти необходимость охлаждения до гелиевых температур все меньше сказывается на их общей стоимости, а применение высокотемпературных сверхпроводников открывает фантастические перспективы.

**Усилители и модуляторы.** При проведении низкотемпературных исследований часто бывает очень удобно непосредственно при гелиевых температурах преобразовывать слабые сигналы постоянного напряжения в переменное, и с помощью трансформатора, тоже при низких температурах, усиливать переменный сигнал до такого уровня, чтобы его без труда можно было измерить при комнатной температуре. Величину постоянного тока через криотрон выбирают таким образом, чтобы дополнительный переменный ток один раз за период переводил криотрон в нормальное состояние. При этом изменяется ток, обусловленный напряжением сигнала. Этот модулированный ток передается на трансформатор, тоже находящийся в гелиевой ванне; выходное напряжение трансформатора измеряется фазочувствительным усилителем. С помощью таких устройств можно достичь чувствительности по напряжению порядка  $10^{-11}$  В при постоянной времени 1 с. Разумеется, для такой высокой чувствительности по напряжению необходимо, чтобы измерительный контур обладал малым (менее  $10^{-5}$  Ом) сопротивлением, что возможно только при применении сверхпроводников.

**Приемники излучения, тепловые вентили, электромагнитные резонаторы.** Сверхпроводящие приемники излучения относятся к группе так называемых болометров. Болометрами называют приборы, в которых для изменения мощности используют изменение сопротивления под действием теплового излучения. Сверхпроводящие болометры обладают тремя существенными достоинствами. Так как они работают при низких температурах, у них очень слабы флуктуационные шумы (около  $10^{-16}$  Вт). Кроме того, благодаря низким температурам теплоемкость измерительной системы значительно меньше, чем при комнатной температуре. Это означает, что одну и ту же разность температур можно получить при гораздо меньшей мощности излучения, что увеличивает и быстродействие приемника. И третье важнейшее преимущество: на кривой перехода электрическое сопротивление очень сильно зависит от температуры. Без всякого труда можно получить чувствительность по температуре порядка 1000 Ом/град. Сверхпроводящие приемники излучения можно использовать для регистрации  $\alpha$ -частиц или других частиц высокой энергии. При попадании частицы в сверхпроводящую пленку происходит локальный разогрев, в результате чего какой-то участок на пути транспортного тока переходит в нормальное состояние и на детекторе появляется напряжение.

Различие теплопроводности в нормальном и сверхпроводящем состояниях нашло применение в тепловых вентилях. При температуре ниже 1 К отношение теплопроводности для свинца превышает 200. При температуре 0,3 и 0,1 К это отношение равно соответственно 500 и 5000. Переход в свинце можно вызвать с помощью довольно слабого магнитного поля порядка 800-900 Гс. Следовательно, тепловое сопротивление свинцовой проволоки при температуре 0,1 К можно уменьшить в 5000 раз с помощью включения магнитного поля. Так мы получаем тепловой ключ.

Полый электромагнитный резонатор представляет собой замкнутую полость простой формы с проводящими стенками. В таких полостях можно возбудить электромагнитные колебания, при которых внутри полости появляются переменные магнитные поля, а в стенках текут высокочастотные переменные токи. Частота колебаний зависит от геометрических размеров резонаторов и от пространственной структуры переменных полей и токов. Интерес к

сверхпроводящим резонаторам с предельно высокой добротностью (т.е. с малыми затуханием и потерями) особенно возрос в связи с возможностью применения их в линейных ускорителях. В таких ускорителях частицы пролетают последовательно через ряд резонаторов, колебания в которых согласованы между собой таким образом, чтобы частицы постоянно ускорялись электрическим полем каждого последующего резонатора. Благодаря очень малым потерям сверхпроводящие резонаторы обладают большими преимуществами. Появляется возможность непрерывной работы сверхпроводящего линейного ускорителя, т.е. пучок частиц может ускоряться в каждом периоде высокочастотных колебаний. Еще одно преимущество заключается в том, что за счет применения сверхпроводящих резонаторов можно было бы сократить длину линейных ускорителей, так как допустимое ускоряющее напряжение на единицу длины в сверхпроводящем резонаторе больше, чем в обычном. Это делает их значительно дешевле.

Еще одна интересная возможность заключается в применении высокочастотных резонаторов в электронных микроскопах с большими напряжениями. С помощью довольно небольших и поэтому весьма удобных в эксплуатации сверхпроводящих высокочастотных резонаторов можно получить очень хорошо управляемые пучки электронов с легко регулируемыми напряжениями порядка нескольких мегаэлектронвольт и большими токами, необходимыми для таких электронных микроскопов.

**Сверхпроводящие магнитометры, сквиды.** Тот факт, что вся совокупность куперовских пар находится в одном единственном квантовом состоянии и поэтому обладает вполне определенной фазой (это свойство называют фазовой когерентностью), дает принципиальную возможность создать магнитометры с чрезвычайно высокой чувствительностью. Для таких измерений изготавливают так называемые Джозефсоновские контакты, главная функция которых состоит в установлении слабой связи между двумя сверхпроводниками, т. е. в создании между ними зоны с малой концентрацией куперовских пар. Эта зона должна обеспечивать слабый обмен (weak link) куперовскими парами. Такую функцию могут выполнять пленки нормальных металлов, сэндвичи, точечные контакты. Наиболее высокой чувствительностью обладает группа магнитометров называемых «сквиды» (superconducting quantum inter-

ferometer devices). Сквиды – это сверхпроводящие кольца или цилиндры со слабыми звеньями. Их получают напылением на тонкую трубочку. Можно изготавливать сквиды из массивного ниобиевого цилиндра, состоящего из двух половин, которые при сборке механически соединяются, например, с помощью непроводящих пластмассовых винтов. Половинки изолированы друг с другом специальной майларовой пленкой для создания слабой связи. Цилиндр без слабого звена полностью экранирует внешнее магнитное поле до тех пор, пока ток в сверхпроводнике не превысит критическое значение. При дальнейшем увеличении поля  $B_a$  магнитный поток  $\Phi_i$  начинает проникать в цилиндр. В области слабого звена критический ток значительно меньше, чем в сверхпроводнике. Благодаря этому магнитный поток начинает проникать в цилиндр при более слабых полях. В этом и состоит назначение слабой связи. Условия квантования при таком малом изменении магнитного потока в цилиндре приводят к появлению четкой структуры на зависимости  $\Phi_i = f(B_a)$ . Эту структуру можно использовать для генерации электрических сигналов, с помощью которых возможны измерения очень малых изменений поля  $B_a$ . Чрезвычайная чувствительность таких устройств позволяет распространить магнитные измерения на все новые области применения. Одним из наиболее важных является медицинская диагностика. Уже получены диаграммы записи сигналов от работы сердца человека. Чувствительность этих приборов ограничивается только статистическими шумами, что свойственно любому методу физических измерений.

## **8. МИРОВОЙ РЫНОК СВЕРХПРОВОДНИКОВ: ИСТОРИЯ И ПРОГНОЗ**

Согласно данным европейского консорциума Connectus мировой рынок сверхпроводников (СП) в 2007 г. составил около 4,0 млрд. EUR. Учитывались как продажи самих сверхпроводящих (СП) -материалов, так и готовых устройств и их компонентов, работа которых основывается на явлении сверхпроводимости. Кроме того, учитывались расходы на эксплуатационное и гарантийное обслуживание, а также заказы на научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы и изготовление прототипов.

Исторически сверхпроводниковые технологии впервые начали использоваться в таких отраслях, как фундаментальные физические исследования и военные технологии, а на следующем этапе СП-технологии начали осваивать медицину. Большинство используемых СП-устройств выполнены на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП). В настоящее время рынок промышленных СП-изделий ограничивается, в основном, сверхпроводящими магнитами различных размеров и назначений: от небольших исследовательских устройств до громадных индустриальных установок.

Сейчас наиболее востребованная для СП-магнитов сфера применения – медицинская диагностика (магниторезонансная томография – МРТ). Эти две области – научно-исследовательское оборудование и МРТ занимают практически весь мировой рынок сверхпроводниковых устройств.

Согласно прогнозам консорциума, к 2013 г. СП-рынок несколько вырастет и составит около 4,5 млрд. EUR. Несмотря на то, что вклад устройств на основе ВТСП возрастет, ключевую роль на рынке будут продолжать играть устройства на базе НТСП материалов. Однако к вышеперечисленным отраслям начинают присоединяться новые области, использующие СП-материалы. Такими областями являются электроэнергетика, информационные технологии, новые методы обработки материалов в промышленности, транспорт и новые приложения в медицине. Для увеличения коммерческой эффективности в данных сферах потребуются дальнейшее развитие технологий, что позволит снизить цену на СП-устройства. Более того, для развития рынка необходимо улучшить связь между пилотными проектами и промышленностью, увеличить производственные мощности, что переведет рынок СП-приложений на принципиально новый уровень инвестиций. Согласно оценкам Connectus, мировой рынок новых СП-применений может к 2013 г. составить 0,6 млрд. EUR. Ожидается, что доля НТСП будет продолжать расти и к 2013 г. составит 4,6 млрд. EUR. Доля изделий из ВТСП приблизится к 0,5 млрд. EUR в 2013 г. Сегодня на Евросоюз приходится около половины мирового рынка СП. Предполагается, что в будущем доля ЕС существенно снизится, в первую очередь, вследствие бурного развития экономики азиатского региона.

## Контрольные вопросы

### К главам 1-6

1. С какой особенностью диаграммы состояния системы Nb-Ti связан довольно широкий диапазон температуры перехода в сверхпроводящее состояние ( $T_c$ )?
2. От каких факторов зависит критический ток Nb-Ti сверхпроводников?
3. Для чего проводят ТМО Nb-Ti композиционных прутков при изготовлении сверхпроводников?
4. Чем отличается назначение ниобиевого диффузионного барьера в NbTi и Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводниках?
5. Примеси из какой группы ( $\alpha$ -стабилизаторы или  $\beta$ -стабилизаторы) в большей степени влияют на технологичность композиционных прутков при получении NbTi сверхпроводников?

### К главе 7

1. Какие свойства сверхпроводников лежат в основе их высоко-точных применений?
2. В чем различие в принципах действия термоядерного и обычного атомного реактора?
3. Возможно ли создать склад энергии?
4. Какое свойство сверхпроводников используется при создании транспорта на магнитной подушке?
5. Какое основное требование предъявляют к магнитному полю при конструировании ЯМР – томографов?
6. Какое свойство сверхпроводящих материалов используется при работе тепловых ключей?

## Список рекомендуемой литературы

### Основная литература:

1. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. / Под ред. В.Р. Карасика. — М.: Мир, 1976.
2. Губкин И.Н. Заметки о технологии выплавки и переработки NbTi слитков в прутки. — М.: ВНИИНМ, 2006.
3. Никулин А.Д., Филькин В.Я., Шиков А.К. // Сверхпроводящие композитные материалы. Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. Т. XXXIV. № 4. 1989. С. 519 — 527.
4. Металлургия сверхпроводящих материалов. / Под ред. Т. Люмана и Д. Дью-Хьюза. — М.: Metallurgia, 1984. С. 15 — 54.
5. Металловедение и технология сверхпроводящих материалов: Пер. с англ. / Под ред. С. Фонера, Б. Шварца (США, 1981). — М.: Metallurgia, 1987.
6. Collings E.W. “Stabilizer design considerations in fine-filament Cu/NbTi composites”, *Advances in Cryogenic engineering materials*. Vol. 34. 1988. Pp. 867-877.
7. Шиков А.К. Российские низкотемпературные сверхпроводники. // Национальная металлургия. 2004. №3. С. 33 — 41.

### Дополнительная:

1. Lee P.J., Larbalestier D.C. Determination of the flux pinning force of  $\alpha$ -Ti ribbons in Nb 46,7 wt.% Ti produced by heat treatments of varying temperature duration and frequency. *J. Mat. Sci.* Vol.23. 1988. Pp. 3951-3957.
2. Vedernikov G.P., Shikov A.K., Potanina L.V., Gubkin I.N., Scherbakova O.V., Salunin N.I., Korpusov V.U., Novikov S.I., Novikov M.S. Multifilament superconducting wire based on NbTi alloy in a combined copper/copper-nickel matrix//*Advances in Cryogenic engineering materials*. Vol. 50B. 2004. Pp. 330-10.
3. Wilson M.N. NbTi superconductors with low ac loss: A review // *Cryogenics*. Vol. 48. 2008. Pp. 381-395.

Дергунова Елена Александровна  
Потанина Людмила Владимировна  
Губкин Игорь Николаевич

**ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ NBTI  
СВЕРХПРОВОДНИКОВ.  
ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Учебное пособие

Редактор Шумакова Н.В.  
Оригинал-макет изготовлен Алиевым Р.Т.

---

Подписано в печать 11.08.09	Формат 60x84 1/16	
Печ. л. 3,0.	Уч.-изд. л. 3,0.	Тираж 100 экз.
Изд. № 061-1	Заказ	

---

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ",  
115409, Москва, Каширское ш., 31.  
Типография МИФИ.