



+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

6209/2-80

22/2-80
P8-80-594

В.М.Дробин, Е.И.Дьячков, В.Г.Луппов,
А.Никитиу*, Р.Херцог, Ф.Хованец, И.С.Хухарева

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ
РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ

Направлено в ЖТФ

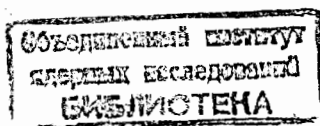
* Институт физики и технологии материалов,
Бухарест.

1980

Для изготовления сверхпроводящих магнитных систем ускорителей и других экспериментальных установок применяются транспонированные кабели с металлической пропиткой, отличающиеся хорошей стабильностью и позволяющие получать высокую конструктивную плотность тока. Однако при работе в импульсном режиме возникают энергетические потери, которые в значительной степени определяются эффективным поперечным сопротивлением матрицы композитного проводника и сопротивлением металлического наполнителя кабеля ^{1/}. Конструирование и оптимизация подобных магнитов требуют практического знания этих величин. В настоящей работе приводятся результаты измерения зависимостей электросопротивлений от температуры и магнитного поля для медной матрицы композитного проводника, различных по составу припоев, и некоторые данные по мельхиору. Характерные параметры измеренных образцов собраны в таблице. Сопротивление разных припоев /образцы №1-3/, измерялось на образцах цилиндрической формы с диаметром 0,65 мм. Сопротивления ниобий-титана /образец №4/ и меди /образцы №№5-9/ измерялись на одиночных мелко-дисперсных проводах диаметром 0,5 мм, содержащих 1045 сверхпроводящих нитей диаметром 10 мкм в медной матрице с шагом твиста 4-24 мм. Для определения сопротивления Nb-Ti медь на измеряемой участке удалялась с помощью травления ^{2/}.

При измерении сопротивления медной матрицы отклонение тока в ниобий-титановые нити составляло 3% при комнатной и 0,1% при низкой температурах, что учитывалось при расчете удельного сопротивления.

Сопротивление мельхиора /образец №10/ измерялось на трубке диаметром 5 мм с толщиной стенки 0,5 мм, которая использовалась для полого сверхпроводящего кабеля в магните с принудительной циркуляцией охлаждающего гелия ^{3/}. Зависимость удельных сопротивлений измеренных образцов от температуры в нулевом магнитном поле представлена на рис.1. Критическая температура NT-50 равнялась 9,2 К, припой ПОС-40 - 7,05 К. Удельное сопротивление сплава NT-50 в нормальном состоянии несколько выше, чем у мельхиора, и более чем на три порядка выше, чем у медной матрицы композитного сверхпроводника. Медная матрица измеряемых образцов содержала, по-видимому, большое количество примесей, т.к. удельное сопротивление ее выше, чем обычно приводятся в литературе: примерно в 1,5 раза по сравнению с ^{1/}, и более, чем в 5 раз по сравнению с ^{6/}. Остаточное удель-



Таблица

№№	Образец	ρ_{300K}	$\rho_{ост.}$	$\gamma = \frac{\rho_{300K}}{\rho_{ост.}}$	$\frac{\Delta\rho_N}{\rho_{ост.}}$
		$10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$10^{-10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$		
1.	$\text{Sn}_{0,95}\cdot\text{Ag}_{0,05}$ /ПСр0-5-95/	11,70	10,67 *	109,6	140
2.	$\text{Pb}_{0,6}\text{Sn}_{0,4}$ /ПОС-40/	23,46	275,0	8,53	10,0
3.	10 в. ч. In2 + 1 в. ч. $\text{Sn}_{0,34}\text{Cd}_{0,33}\text{Zn}_{0,33}$ /ИН+КАДО-33/	31,10	191,2 *	16,25	240
4.	Nb + 47 вес%Ti /НТ-50/	58,62	56,14	1,21	0
5.	Cu • /13,14/	2,00	3,816	52,50	50,4
6.	Cu о /18/	1,82	3,055	59,60	57,9
7.	Cu Δ /30/	1,19	2,969	40,00	35,5
8.	Cu ∇ /32/	1,47	3,600	40,86	35,5
9.	Cu ▽ /36/	2,01	4,303	46,64	46,2
10.	Мельхиор МНЖМц 30-1-1	44,4	41,8*	1,06	-

* Измеряли при $T=4,2 \text{ K}$

ное сопротивление припоя ПСр0-5-95 в 2 раза, а припоев ИН2+КАДО-33 и ПОС-40 на два порядка выше, чем у медной матрицы. На температурной зависимости припоя ИН2+КАДО-33 наблюдается ступенчатое изменение в районе 8К, что объясняется, очевидно, сверхпроводящим переходом одного из компонент этого соединения.

Измерения относительного изменения сопротивления в магнитном поле проводились при температурах 12К и 4,2 К. Для припоя ПОС-40 данные при 4,2 К отнесены к величине удельного сопротивления в поле $H_0 = 0,04 \text{ T}$, когда образец переходил из сверхпроводящего в нормальное состояние. Во всех измерениях магнитное поле было направлено перпендикулярно току в образце. Полученные результаты приведены на рис.2 для припоев и на рис.3 для медной матрицы. Видно, что наибольшей чувствительностью к магнитному полю обладает припой ПСр0-5-95, который в поле 7Т увеличивает сопротивление более чем в 3 раза. На рис.4 данные по магнитосопротивлению для образцов медной матрицы представлены в виде диаграммы Колера [4].

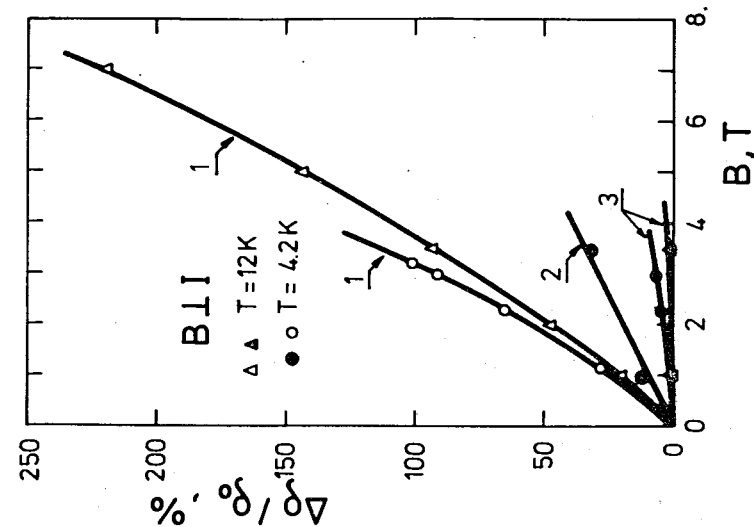


Рис.2. Относительное увеличение электро-сопротивления припоев в магнитном поле. 1 - ПСр0-5-95; 2 - ИН2+КАДО-33; 3 - ПОС-40.

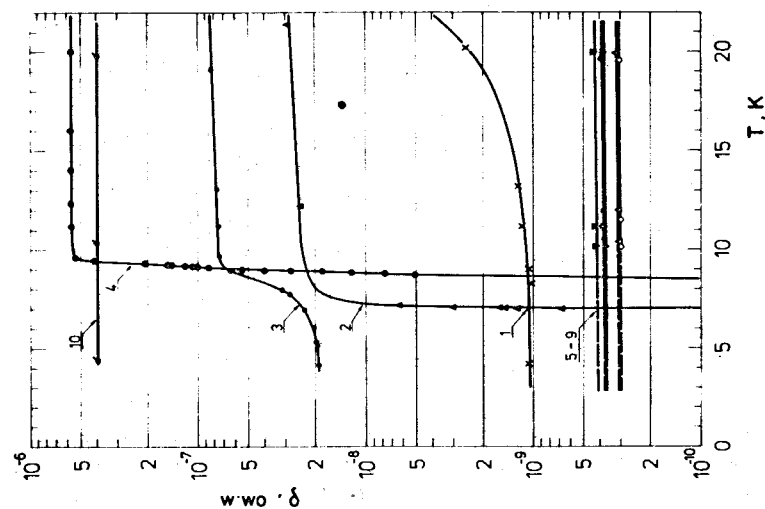


Рис.3. Зависимость удельных сопротивлений от температуры при $B=0$. Номера кривых соответствуют указанным в таблице.

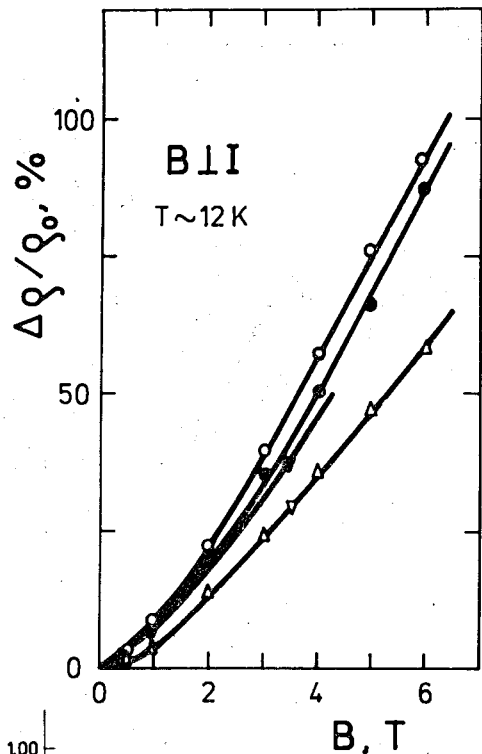


Рис.3. Относительное увеличение электросопротивления меди в магнитном поле. Обозначение экспериментальных точек соответствует обозначениям в таблице.

Согласно модели Займана^{/5/} в области низких значений гВ:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = (гВ)^2,$$

для больших значений гВ:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \approx a \cdot (гВ).$$

Рассчитанная по этой модели кривая изображена сплошной линией. При $гВ < 50$ выполняется квадратичный закон изменения магнитосопротивления; в больших полях $\Delta\rho/\rho_0$ растет линейно с коэффициентом $a = 0,29 \cdot 10^{-2} \text{ T}^{-1}$ /в модели Займана $a = 0,23 \cdot 10^{-2} \text{ T}^{-1}$ /. Как видно из рисунка, экспериментальные данные, вполне удовлетворительно согласуются с законом Колера, подтверждают модель Займана.

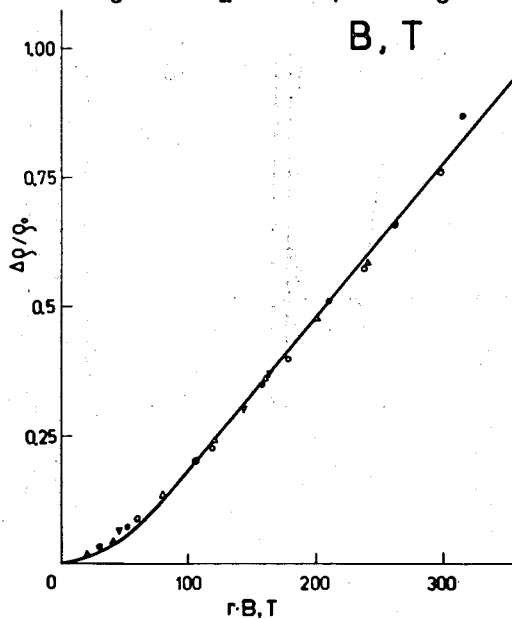


Рис.4. Диаграмма Колера для меди. Экспериментальные точки соответствуют указанным в таблице. Сплошная линия - расчет по модели Займана^{/5/}.

Из приведенных данных становится ясным, что для уменьшения кооперативных динамических потерь в пропаянном кабеле необходимо выбирать либо припой ИН2+КАДО-33, либо ПСр0-5-95, т.к. они имеют наибольшее остаточное удельное сопротивление в рабочей области, т.е. при $T \gtrsim 6 \text{ K}$. Если в данном устройстве не требуется высокой конструктивной плотности тока, то потери могут быть значительно уменьшены путем формирования кабеля с использованием непропаянного соединения проводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. "Мир", М., 1976, гл.4-6.
2. Дьячков Е.И. и др. ОИЯИ, Р8-12945, Дубна, 1979.
3. Агапов Н.Н. и др. ОИЯИ, Р8-12786, Дубна, 1979.
4. Kohler M. Ann.Phys., 1941, 40, p.601.
5. Ziman J.M. Proc.Roy.Soc.London, Ser.A, 1954, 226, p.436.
6. Pawlek F., Rogalla D. Cryogenics, 1966, 6, No.1, p.14.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 сентября 1980 года.