

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

C 3933  
B-575  
2467/84

P8-84-80

Н.М.Владими́рова, Е.И.Дьячков,  
Д.Лазэр, И.С.Хухарева

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ  
В КОМПОЗИТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

1984

При разработке и проектировании сверхпроводящих магнитных систем существенными параметрами являются продольное и поперечное сопротивления композитного сверхпроводника в нормальном состоянии. В настоящее время наиболее часто используется проводник, состоящий из большого количества /от нескольких десятков до нескольких тысяч/ тонких ниобий-титановых нитей и медной матрицы. Сердцевина такого проводника представляет собой гексагональное построение сверхпроводящих нитей или кластеров, разделенных медными прослойками, снаружи - относительно толстый медный чехол. Кластеры, в свою очередь, могут состоять из сверхпроводящих нитей и тонких медных перегородок.

В данной работе представлены результаты измерения продольного сопротивления технических композитных сверхпроводников с различным количеством и размером ниобий-титановых нитей. Характеристики образцов приведены в таблице. Измерения проводились при температуре  $-12\text{ K}$ , когда удельное сопротивление Nb-Ti на три порядка выше Cu, так что продольное сопротивление образца полностью определялось медью. В процессе измерения снимались вольт-амперные характеристики, по которым затем рассчитывалось сопротивление образца. Для вычисления удельного сопротивления меди в наружном чехле и в сердцевине измеряли сопротивление проволоки в исходном состоянии и после травления поверхности слабым раствором азотной кислоты до появления сердцевинной структуры. Как правило, измерялось 2-5 образцов одного наименования и результаты усреднялись. Как видно из таблицы, для большинства образцов выполняется соотношение  $\rho_{\parallel} > \rho_{Cu}$ , где  $\rho_{\parallel}$ ,  $\rho_{Cu}$  - продольное удельное сопротивление матрицы соответственно в сердцевине и наружном чехле. Чтобы понять влияние размерного эффекта на полученные результаты, мы рассчитали геометрические параметры проводника:  $b$  - среднее расстояние между соседними сверхпроводящими нитями,  $a$  - среднее расстояние между центрами нитей, в предположении, что в сердцевине сверхпроводящие нити распределены равномерно. Эти величины, а также длины свободного пробега электронов  $l_e$  и отношения  $d_{спн}/a$  и  $l_e/a$  приводятся в таблице.  $l_e$  оценивалось по измеренным значениям  $\rho_{Cu}$  по формуле<sup>/1/</sup>:  $\rho_{Cu} \cdot l_e = 7,7 \cdot 10^{-16} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ . Как следует из таблицы,  $l_e$  сравнимы с характеристическими размерами проводников, что говорит о возможном проявлении размерного эффекта. Это подтверждается рис.1, на котором приведена зависимость удельного сопротивления меди от размеров проводника по литературным данным<sup>/2,3/</sup> и нашим. Видно, что наши экспериментальные точки не противоречат имею-

Таблица I

№ образца	$\phi$ мм	$d_{\text{спн}}$ мм	$N_{\text{спн}}$	$S_{\text{H}}$ $10^{-10}$ Ом·м	$S_{\text{Cu}}$ $10^{-10}$ Ом·м	$b$ мм	$l_e$ мм	$a$ мм	$l_e/a$	$d_{\text{спн}}/a$	$\rho_{\text{H}}/\rho_{\text{Cu}}$
25	0,5	6	2970	6,41	1,91	1,3	4,04	7,3	0,55	0,82	3,36
269	0,5	10	1045	3,19	0,61	3,2	12,73	13,2	0,96	0,76	5,27
13	0,5	10	1045	3,03	2,73	3,2	2,11	13,2	0,16	0,76	1,11
21	0,5	10	1045	2,45	1,65	3,2	3,68	13,2	0,28	0,76	1,48
4	1,0	20	1045	1,98	0,61	7,14	12,73	27,1	0,47	0,74	3,27
201	1,0	50	201	3,57	2,28	12,4	3,38	62,4	0,054	0,80	1,56

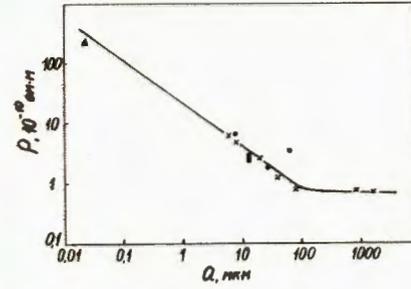


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления меди от размеров проводника:  $\Delta$  - проводник с прямоугольным сечением  $220 \times 200 \text{ \AA}^2$  /2/,  $\times$  - проводник с круглым сечением /3/,  $\cdot$  - наши результаты для медной матрицы композитного сверхпроводника.

щейся зависимости  $\rho(a)$ , хотя в работах /2,3/  $a$  - поперечный размер медных проводников, а в нашем случае это - усредненное расстояние между центрами соседних сверхпроводящих нитей; кроме того, никак не учтено различие в чистоте исходной меди.

Один из наших образцов - 25 отличался от остальных тем, что у него сверхпроводящие нити окружены тонким ниобиевым слоем для предотвращения диффузии титана в медь. В процессе измерений этот образец ничем не был выделен. Следовательно, диффузные слои не оказывают заметного влияния на продольное сопротивление медной матрицы.

В /4/ проведен численный расчет продольного сопротивления композитных сверхпроводников в нормальном состоянии с учетом размерного эффекта. Полученные зависимости  $\rho_{\text{H}}/\rho_{\text{Cu}}$  от  $l_e/a$  представлены для различных значений параметра  $d_{\text{спн}}/a$ , при этом  $\rho_{\text{Cu}}$  отождествляется с сопротивлением массивной меди. На рис.2 воспроизведены эти зависимости для двух значений параметра  $d_{\text{спн}}/a = 1$  и  $0,84$  вместе с нашими экспериментальными точками и данными /5/, в которой измеряли продольное сопротивление композитных сверхпроводников. Видно, что экспериментальные точки качественно достаточно хорошо следуют расчетной зависимости, хотя значения параметра несколько не совпадают по абсолютной величине.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Размерный эффект вносит заметный вклад в продольное удельное сопротивление медной матрицы промышленных мелкодисперсных сверхпроводников.

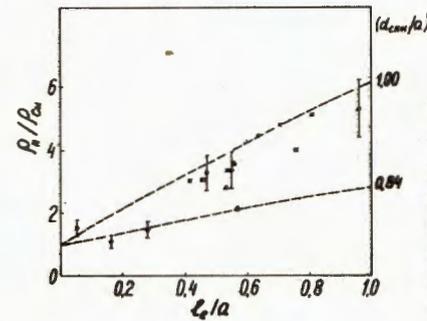


Рис.2. Зависимость отношения  $\rho_{\text{H}}/\rho_{\text{Cu}}$  от  $l_e/a$  для композитных сверхпроводников:  $\cdot$  - экспериментальные результаты нашей работы,  $d_{\text{спн}}/a = 0,78 \pm 0,04$ ;  $\times$ ,  $\Delta$  - экспериментальные результаты /5/ для  $d_{\text{спн}}/a = 0,86$  и  $0,84$  соответственно; ---- - теоретические кривые /4/.

2. Зависимость  $\rho_{\parallel} / \rho_{Cu}$  от  $(l_e/a)$  имеет характер, близкий к линейному при  $a < 60$  мкм, и является универсальной для проводников подобного типа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Brandli G., Olsen J. Mater.Sci.Eng., 1969, 4, p.61.
2. Alice E.White, Tinkham M., Skocpol W.I. Physical Rev.Lett., 1982, 48, 25, p.1752.
3. Nakane F. et al. Proceedings of the International Cryogenic Materials Conference, Kobe, Japan, 1982, p.203.
4. Cavalloni C., Monnier R. Helvetica Physica Acta, 1982, 55, p.669-674.
5. Cavalloni C., Kwasnitza K., Monnier R. Appl.Phys.Lett., 1983, 42, 8, p.734.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 февраля 1984 года

Владимирова Н.М. и др.

Р8-84-80

Размерный эффект в композитных сверхпроводниках

Представлены результаты измерения продольного сопротивления медной матрицы в промышленных композитных сверхпроводниках с различным количеством и размером ниобий-титановых нитей. Измерения проводились при температуре  $-12$  К, когда удельное сопротивление ниобий-титана на порядок выше, чем у меди, так что продольное сопротивление образца полностью определялось медью. На каждом образце было получено два значения  $\rho_{Cu}$  - в наружном слое, свободном от сверхпроводника, и  $\rho_{\parallel}$  - в сердцевинной части проводника, состоящей из меди и нитей ниобий-титана. Для всех образцов выполняется соотношение  $\rho_{\parallel} > \rho_{Cu}$ . Установлено, что размерный эффект вносит заметный вклад в величину  $\rho_{\parallel}$ .

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод автора

Vladimirova N.M. et al.

Р8-84-80

Size Effect in Multifilament Superconducting Wires

The longitudinal resistance of a copper matrix in commercial multifilament superconducting wires with various number and diameter of Nb-Ti filaments has been measured at  $T = -12$  K, when  $\rho_{Nb-Ti} \sim 10^3 \rho_{Cu}$ , so that the longitudinal resistance of a sample is entirely determined by a copper. For each sample two different values of resistance have been measured:  $\rho_{Cu}$  (in the surface superconductor-free layer) and  $\rho_{\parallel}$  (in the core consisting of both Cu and Nb-Ti). The relation  $\rho_{\parallel} > \rho_{Cu}$  is valid for all samples. The size effect makes a significant contribution to the value of  $\rho_{\parallel}$ .

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984