

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Г 657

P8-87-315

И.Н.Гончаров, Л.Миу*

УЛУЧШЕННЫЕ ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Направлено в журнал "Cryogenics"

*Центральный институт физики, Бухарест

1987

При создании различных сверхпроводящих устройств, главным образом магнитных систем, возникает необходимость соединять между собой сверхпроводящие токонесущие элементы, имеющие ограниченную длину. При этом достаточно часто требуется, чтобы такие соединения были разборными, а их критический ток был не меньше, чем у исходного проводника. Наиболее простыми и надежными соединениями, удовлетворяющими этим условиям, является паяные стыки, подробно исследованные, например, в работе^{/1/}. Цель настоящей работы - представить результаты исследования улучшенных паяных соединений, которые при той же длине и примерно тех же поперечных размерах имеют существенно более низкие значения электросопротивления R_{joint} .

В качестве сверхпроводящих токонесущих элементов были взяты многожильные композитные шины двух типов, имеющие одинаковые поперечные размеры $2 \times 3,5$ мм с ниобий-титановыми нитями из сплава NT-50 диаметром 80-90 мкм в медной матрице. Шина I содержала 36I сверхпроводящую нить, сгруппированные в 19 кластеров, сравнительно равномерно распределенных по сечению. Шина II (более позднего изготовления, чем шина I, и имевшая более высокий критический ток I_c) содержала около 390 сверхпроводящих нитей, размещавшихся однородно по сечению, но так, что центральная зона шины и её наружный слой $\sim 0,3$ мм были свободны от них. В некоторых случаях (которые в таблице с результатами в столбце "форма шин в соединении" будут обозначены как "прокат") оба конца соединяемых шин на длине перекрытия были прокатаны в холодную до размеров $1 \times 4,5$ мм.

Объединенный институт
ядерных исследований
БНБЛРОСТЕНА

В качестве припоев были использованы либо сплав Ag-95\% Sn , имеющий остаточное удельное сопротивление $\rho_n = 10,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{см}$ с заметной зависимостью от магнитного поля (при $B = 4 \text{ Тл}$ и $T = 4,2 \text{ К}$ $\Delta\rho/\rho_n$ порядка 120% ^{1/2/}), либо сплав Pb - 50\% Sn , сверхпроводящий при $4,2 \text{ К}$ и имеющий в поле $B \approx 1 \text{ Тл}$ $\rho_n \approx 60 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{см}$.

Соединения были выполнены следующим образом. С концов соединяемых шин на длине их перекрытия удалялся со всех сторон механически слой меди толщиной $\sim 0,15 \text{ мм}$ (при этом обращалось внимание на то, чтобы сверхпроводящие нити не появились на поверхности, т.к. в этом случае из-за их плохой смачиваемости припоем резко возрастало R_{joint}). Затем концы облуживались припоем, накладывались друг на друга внахлест и спаивались при том или ином сжатии. Если во время пайки создавалось специально достаточно сильное сжатие шин для уменьшения толщины слоя припоя меньше $0,1 \text{ мм}$, то такие случаи в таблице обозначены в столбце "степень сжатия при пайке" как "сильн."; в остальных случаях, обозначенных как "слаб", толщина припоя могла превышать $0,1 \text{ мм}$. После этого стык на всей длине обматывался облуженным многожильным сверхпроводящим проводом, $\varnothing 0,5 \text{ мм}$, содержащим IO45 ниобий-титановых нитей $\varnothing 10 \text{ мкм}$ в медной матрице, и все это пропаивалось припоем. В некоторых случаях вместо круглого провода использовали тот же провод, прокатанный до толщины $0,25 \text{ мм}$ ¹⁾. Один из стыков (№ 6 в таблице) был обмотан ленточкой из Nb_3Sn , поверх которой намотан круглый провод HT-50 , с последующей пропайкой. Как правило, длина стыка составляла $2,5+7 \text{ см}$.

1) Прокатка не меняла критического тока провода.

Измерения сопротивления стыков были сделаны по методу определения постоянной времени τ затухания наведенного тока в короткозамкнутой катушке, изготовленной из заданной шины, содержащей одно паяное соединение и погруженной в жидкий гелий. После завершения экспериментов катушки разрезались и измерялись их коэффициенты самоиндукции ($L = 0,3+1,8 \text{ мкГн}$). На основании измеренных τ и L вычислялось $R_{\text{joint}} = L/\tau$ с ошибкой $\pm 15\%$. Реально измерения τ проводились при $I < 0,8 I_c$. При этих условиях не было заметной зависимости сопротивления стыка от тока. Результаты измерения сопротивления стыков, пересчитанные к одному см его длины представлены в таблице.

Полное сопротивление соединения складывается главным образом из двух компонентов: $R_{\text{joint}} = R_{\text{intern}} + R_{\text{solder}}$. Здесь R_{intern} - внутреннее сопротивление току в шине, а также в сверхпроводнике, окружающем стык, при его протекании из сверхпроводящих жил через матрицу к припою. Оно зависит от геометрии протекания тока в шине и от так называемого поперечного сопротивления композита (см., например, ^{1/3/}), характеризуемого эффективной величиной ρ_{\perp} . Последнее зависит от диаметра сверхпроводящих нитей, средней плотности и геометрии их расположения в матрице, поверхностного барьера на границе между ниобий-титаном и медью и т.п. Тенденция такова, что чем меньше диаметр нитей и больше их плотность, тем выше ρ_{\perp} . Реально при $T = 4,2 \text{ К}$ ρ_{\perp} меняется от долей удельного электросопротивления меди матрицы до величины, превышающей последнюю в несколько раз (для диаметра нитей $\sim 10 \text{ мкм}$ и коэффициента их заполнения $\sim 50\%$). Как видно из таблицы результатов, внутреннее сопротивление у шины II существенно больше, чем у шины I (ср. стык № 7 со стыком № 10 при $B_{\text{ext}} = 0$).

Таблица. Характеристики исследованных соединений

Соединение	Форма шины в соединении	Припой	Степень сжатия при пайке	Чем обмотано соединение	V_{ext} , Тл	R_{joint} на 1 см. длины, $10^{-9} \Omega$
шина I						
1	исходн.	Ag - Sn	слаб.	нет	0	22
2	исходн.	Ag - Sn	слаб.	провод кругл.	0	13
3	прокат.	Ag - Sn	слаб.	нет	0	13,2
4	прокат.	Ag - Sn	слаб.	провод кругл.	0	10,2
5	исходн.	Ag - Sn	сильн.	провод прокат.	0	7,2
6	прокат.	Ag - Sn	сильн.	фольга Pb-Sn + провод кругл.	0	5
7	исходн.	Pb - Sn	сильн.	нет	0 I	5,7 24
8	исходн.	Pb - Sn	сильн.	провод прокат.	0 I	2,3 15
шина II						
9	исходн.	Ag - Sn	слаб.	провод прокат.	I	16,5
10	исходн.	Pb - Sn	сильн.	нет	0 I	20 38

Сопротивление слоя припоя R_{solder} зависит от его состава и толщины, а также от того, находится ли припой в сверхпроводящем или нормальном состоянии. Для сравнения укажем, что слой припоя толщиной 0,1 мм и площадью 10 мм x 3,5 мм имеет остаточное сопротивление в случае Ag-Sn около $3 \cdot 10^{-9} \Omega$, а в случае Pb - Sn около $15 \cdot 10^{-9} \Omega$. В таблице результатов указано, в каком внешнем магнитном поле V_{ext} проводились измерения: при $V_{ext} = I T$ припой Pb - Sn в нормальном состоянии, а при $V_{ext} = 0$ - в сверхпроводящем. Следует учесть, что в некоторых случаях даже при $V_{ext} = 0$ и $T = 4,2$ К припой Pb - Sn может оказаться в несверхпроводящем состоянии (например, за счет протекания тока, превышающего критическое значение в магнитном поле, создаваемом этим током). Отметим, кстати, что в тех случаях, когда стык не был обмотан сверхпроводником, припой с обеих торцевых поверхностей шин удалялся, т.к. в противном случае получались иные - более низкие - значения R_{joint} .

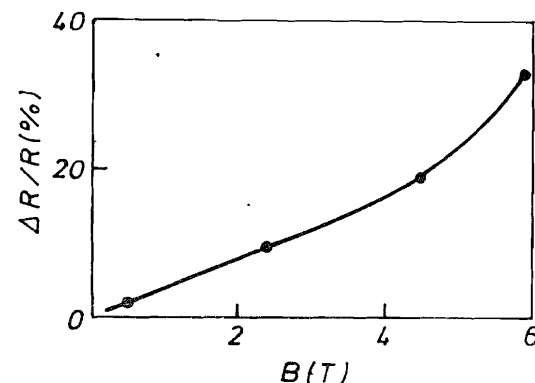
Результаты, приведенные в таблице, позволяют сделать несколько выводов. Во-первых, если соединение находится в условиях, когда припой Pb-Sn оказывается в несверхпроводящем состоянии, то для получения более низкого R_{joint} предпочтительнее использовать припой Ag-Sn (ср. стык № 5 и № 8 при $V_{ext} = I T$). Во-вторых, использование дополнительного обматывания стыка сверхпроводником приводит к весьма заметному снижению сопротивления (ср., например, стыки № 1, № 2 и № 5) как за счет увеличения площади контакта, так и за счет уменьшения R_{intern} , связанного с изменением геометрии протекания тока в шине. При этом результаты оказываются лучше, если вместо круглого провода использовать прокатанный и, тем более, фольгу. В-третьих,

ещё большего снижения R_{joint} можно достичь, если предварительно прокатать соединяемые концы шин (ср. стыки № 1 и № 3, а также № 5 и № 6), т.к. и в этом случае действуют обе вышеупомянутые причины. Сочетание последних двух методов приводит к минимальным для паяных соединений сопротивлениям стыков (для несверхпроводящего припоя см. стык № 6).

Особенно большой эффект снижения сопротивления паяного стыка возникает в случае, если предложенный здесь метод применять для соединения композитных сверхпроводящих токонесущих элементов с круглым поперечным сечением (например, трубчатые проводники для сооружаемого в ОИЯИ нуклотрона^{/4/}).

Отметим, что примерно та же величина сопротивления получается, если обмотанный вокруг стыка сверхпроводник разрезать с одной стороны вдоль токонесущего элемента так, чтобы разрез оказался в плоскости стыка. При этом площадь контакта оказывается неизменной, хотя, разумеется, максимальный сверхпроводящий ток, который можно пропустить между соединяемыми проводниками, будет в 2 раза меньше. Последнее обычно не бывает критичным, т.к., например, при $T = 4,2$ К использованный нами провод $\varnothing 0,5$ мм в поле 2,5 Тл имеет $I_c = 240$ А, так что на характерной длине стыка ~ 5 см уложится ≈ 50 прокатанных проводов с суммарным критическим током > 10 кА. Указанное обстоятельство можно использовать для существенного упрощения изготовления модернизированного соединения путем предварительного изготовления спаянной "трубки" из провода, которая разрезается вдоль и затем накладывается на стык с последующей пропайкой выбранным припоем (при необходимой степени сжатия).

Для одного из стыков (№ 6) нами была определена зависимость R_{joint} от внешнего магнитного поля < 6 Тл, представленная на рисунке. Величина эффекта много меньше, чем магнетосопротивление припоя Ag-Sn^{/2/} и сопоставима с зависимостью $\rho_1(B)$, изученной в работе^{/3/}.



Зависимость от магнитного поля относительного прироста сопротивления стыка № 6 при $T = 4,2$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shakhhtar V.N., Pylinina S.N. - In: Proceedings of the Sixth international conference on magnet technology, ALFA, Bratislava, 1978, p. 772-777.
2. Дробин В.М., Дьячков Е.И., Луппов В.Г., Никитиу А., Херцог Р., Хованец Ф., Хухарева И.С. - Препринт ОИЯИ Р8-80-594, Дубна, 1980, с. 5.
3. Drobin V.M., Dyaohkov E.I., Khukhareva I.S., Luprov V.G., Nichitiu A. - Cryogenics, 1982, V 22, p. 115-119.
4. Baldin A.M., Averichev S.A., Beznogikh Yu.D. et al - IEEE Trans. on nuclear science, 1983, V NS-30, p. 3247-3249.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 мая 1987 года.