

Характеристики провода $Bi - 2223 / (Ag + Au)$ для тоководов на 600 А

А.К.Шиков, Н.И.Козлѐнкова, И.И.Акимов, П.А.Кузнецов,
Д.Н.Раков, Ф.В.Попов
ГНЦ ВНИИ НМ им. А.А.Бочвара, Москва, Россия
И.В.Богданов, С.С.Козуб, А.А.Олюнин, П.А.Щербаков
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Использование $BiPb2223$ проводников для изготовления тоководов требует замены Ag оболочки на материалы с более низкой в интервале температур 4.2-4.7 К теплопроводностью, что позволяет уменьшить приток тепла по тоководам в криогенное устройство. В то же время такая оболочка не должна приводить к деградации T_c и J_c . Фуджишира с соавторами первым детально исследовал возможность замены серебряной оболочки на $Ag + Au$ [1]. Было показано, что использование оболочки с содержанием серебра до 11 ат. % не приводило к деградации критического тока, при этом теплопроводность ленточного проводника составляла 0,2 В/см К при 77 К, что близко к теплопроводности сплава $Cu - Zn$.

Хюттен с соавторами [2] изучал влияние оболочек из сплава серебра с целым рядом элементов на процесс получения, микроструктуру и критическую плотность тока $Bi - 2223$ ленточных проводников. Приемлемые с точки зрения J_c результаты были получены для оболочек $Ag_{93,86}Cu_{6,14}$ и $Ag_{99}Pd$. В остальных случаях взаимодействие оболочки с фазой $Bi - 2223$, образование трещин или сосисочности волокон при деформации, обуславливало сильную деградацию критического тока.

В данной работе исследовались проводники $Bi - 2223 / (Ag + 10 \text{ ат. \% Au})$, предназначенные для изготовления тоководов на 600 А.

Композиционный 37-волоконный ленточный проводник в оболочке ($Ag + 10 \text{ ат. \% Au}$) был изготовлен на основе прекурсора $Bi_{1,8}Pb_{0,4}Sr_{2,0}Ca_{2,2}Cu_{3,0}O_x$ методом "порошек-в-трубе". Метод включает заполнение металлических труб порошком-прекурсором, волочение, плоскую прокатку и термическую обработку с промежуточными деформациями между циклами отжига. Поперечное сечение ленточного проводника представлено на рис.1. Коэффициент заполнения провода по сверхпроводящей керамике составляет 30%. Проводники характеризовались по результатам измерения критической температуры индуктивным методом, критической плотности тока $J_c(T, H)$, удельного сопротивления, теплопроводности и теплоемкости матрицы и композита в целом в интервале температур 60-300 К.



Рис. 1: Поперечное сечение композиционного ленточного проводника $Bi - 2223$ в оболочке из сплава $Ag + 10 \text{ ат. \% Au}$.

Индуктивные измерения критической температуры дали значение температуры начала перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 107 \text{ К}$, что свидетельствует об отсутствии взаимодействия прекурсора с оболочкой.

Короткие куски провода длиной 3 см характеризовались критическим током, лежащим в интервале 16–19 А и 65–98 А при температурах 77 и 4,2 К соответственно. Максимальная критическая плотность тока по керамике составляла $J_c(4^2 \text{ К, s.f.}) = 4,67 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$ и

J_c (77 K , $s.f.$) $= 9,0 \cdot 10^3\text{ A/cm}^2$. На кусках провода длиной 35 см значение критического тока составляло 11-12,5 А. Критический ток достигает значения 75 А при $T = 25\text{ K}$ для лучших образцов. На рис.2 приведена зависимость $I_c = f(T)$, снятая в собственном магнитном поле образца с током. Зависимости критического тока от магнитного поля, снятые при 4,2 К и температурах вблизи точки кипения жидкого азота, приведены на рис.3-4.

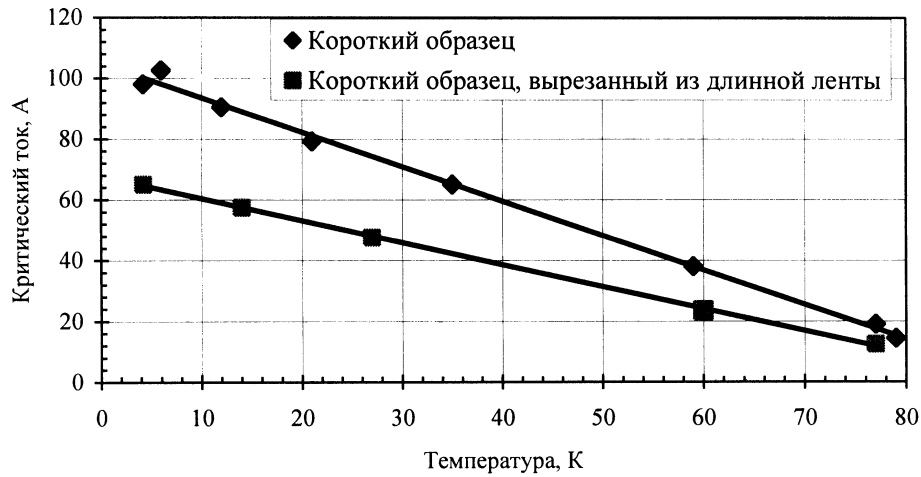


Рис. 2: Зависимость критического тока от температуры в нулевом внешнем магнитном поле композиционного ленточного проводника $Bi - 2223$ в оболочке из сплава $Ag + 10\text{ ат. \% Au}$.

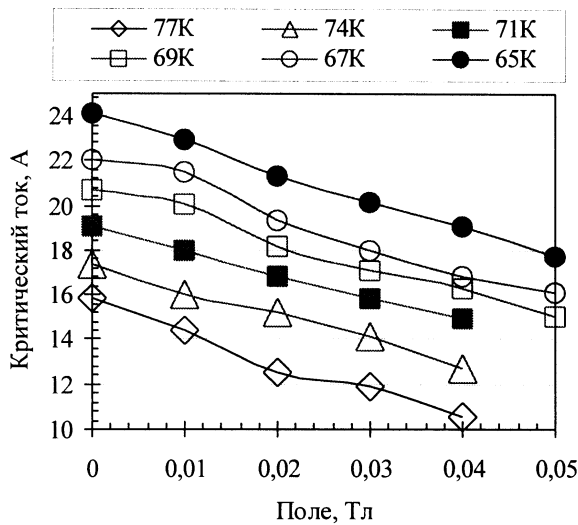


Рис. 3: Влияние магнитного поля на критический ток ВТСП-ленты при температурах жидкого азота.

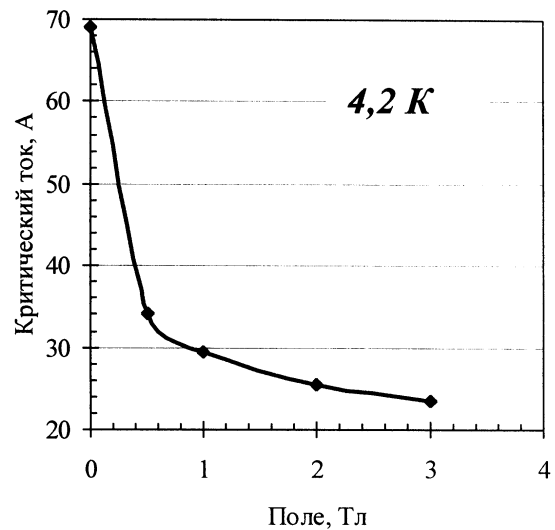


Рис. 4: Влияние магнитного поля на критический ток ВТСП-ленты при температуре жидкого гелия.

Сопоставление результатов по влиянию магнитного поля на критический ток изготовленных ранее проводников в матрице из Ag и образцов в матрице ($Ag + 10\% Au$) показало, что использование оболочки $Ag + 10\text{ ат. \% Au}$ практически не изменяет характер кривых $J_c = f(H)$.

Проведенные измерения I_c в процессе термоциклирования (300-77-300 К) плоских проводников показали, что после 10 термоциклов критический ток не изменяется.

Исследовано влияние механических напряжений при сжатии и растяжении образцов ВТСП ленты в жидком азоте на критический ток. Сжимающая и растягивающая нагрузки прикладывались перпендикулярно широкой стороне ленты и вдоль ВТСП-ленты соответственно в специальных приспособлениях. Значение I_c определялось по ВАХ по критерию 1 мкВ/см. Результаты измерений представлены на рис.5, из которого видно, что процесс деградации I_c с увеличением механических напряжений носит пороговый характер и связан с разрушением целостности ВТСП-волокон. Это подтверждается тем, что после начала деградации I_c уменьшение нагрузки не приводит к увеличению критического тока (кривая 1, рис.5). При сжатии разрушение ВТСП волокон происходит при меньших напряжениях, чем при растяжении.

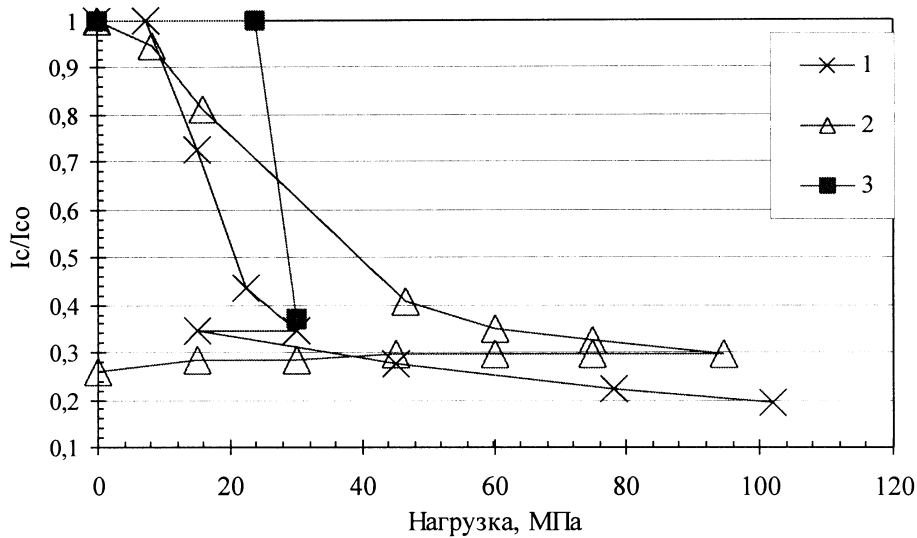


Рис. 5: Зависимость критического тока ВТСП-ленты от механических напряжений при температуре 77 К (1, 2 — сжимающая нагрузка; 3 — растягивающая нагрузка).

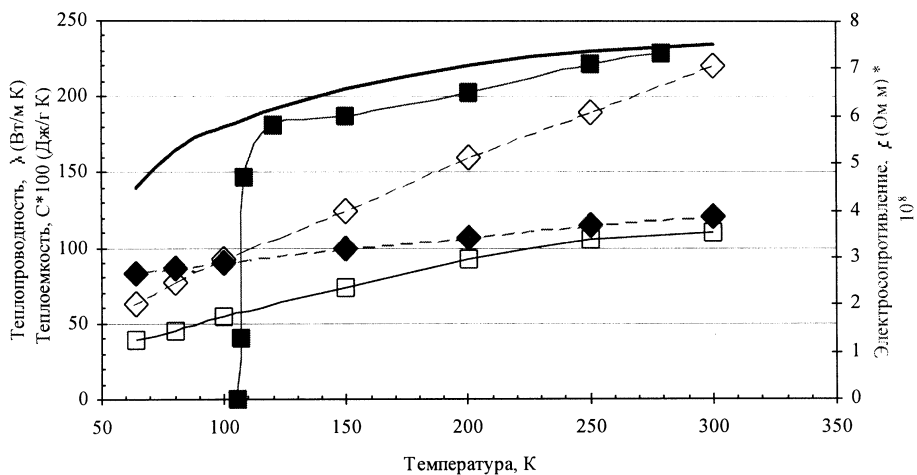


Рис. 6: Теплопроводность (λ), теплоемкость (C) и электросопротивление (ρ) ВТСП-ленты и ее матрицы при низких температурах; сплошная линия — ВТСП-лента; пунктирная линия — сплав $Af + 10 \text{ ат } \% Au$; закрашенные маркеры — электросопротивление (ρ); незакрашенные маркеры — теплопроводность (λ); сплошная линия без маркеров — теплоемкость.

На рис.6 приведены результаты исследования теплопроводности (λ), теплоемкости (C) и удельного сопротивления (ρ) сплава $Ag+10$ ат. % Au и ВТСП ленты при низких температурах. Видно, что теплопроводность матрицы практически линейна в интервале температур 300–100 К. Теплопроводность ВТСП-керамики на несколько порядков ниже, чем матрицы, и можно было бы ожидать снижения проводящих свойств ВТСП-ленты в 1,3 раза. Однако за счет перехода меди из керамики в матрицу в процессе отжига происходит образование тройного сплава $Ag - Au - Cu$, что ведет к дополнительному снижению теплопроводности.

Электросопротивление матрицы имеет линейный характер в интервале температур 60–300 К, для ВТСП-ленты линейность имеет место до температур 120 К, далее начинается переход в сверхпроводящее состояние, который завершается при 105,3 К.

Исследования показали, что в интервале температур 290–77 К относительная термическая деформация ($\Delta l/l_0$) $Bi - 2223$ керамики, сплава $Ag + 10$ ат. % Au и ВТСП ленты составляет $(1,5; 3,4; 2,9) \cdot 10^{-3}$ соответственно.

Проведенные исследования токонесущей способности $J_c(T, H)$, тепловых и электрических свойств плющенных проводников на основе $Bi - 2223$ в оболочке из сплава $Ag + 10$ ат. % Au показали, что полученные проводники имеют характеристики, позволяющие изготовить токовводы с величиной теплопритока существенно более низкой, чем в традиционных токовводах на основе меди.

Список литературы

- [1] Hiroyuki Fujishiro et al. Low Thermal Conductive Bi-2223 Tapes Sheathed with $Ag - Au$ Alloys. IEEE Transactions on Magnetics. 1994, vol. 30, № 4, pp. 1650.
- [2] Hütten A., Schubert M., Roding C. et al. The effect of silver-alloy sheaths on fabrication, microstructure and electrical current density of powder-in-tube processed multifilamentary $Bi - (2223)$ tapes. // Applied Superconductivity. Vol. 2, The Netherlands, 1997, pp. 1255-1258.