

УДК 537.312.62

©1994

О КРИТИЧЕСКОМ ТОКЕ И ПЛОТНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ КЕРАМИКИ $Y\text{-Ba-Cu-O}$, ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПРОКАТКОЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

В.П.Коржов, М.И.Карпов, Б.А.Гнесин

Исследовано влияние величины деформации прокаткой μ на плотность ρ и критическую плотность тока j_c сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_y$. Прокатывалась проволока диаметром 2 мм с сердечником из Y -керамики в Cu -оболочке. Проволока получена гидроэкструзией с последующими прокаткой в калибрах и волочением при комнатной температуре. Зависимости $j_c(\mu)$ и $\rho(\mu)$ имели два максимума при малых (0.15-0.20) и относительно больших (0.85-1.05) величинах деформации. Максимумам j_c и ρ соответствовали наибольшие текстурные коэффициенты.

С открытием высокотемпературной сверхпроводимости в La -керамиках, а затем в Y -керамиках начались работы по получению и исследованию проводников на их основе [1-6]. Однако критическая плотность тока j_c первых проволочных образцов была мала. В нулевом магнитном поле она обычно не превышала ~ 1000 А/см² при 77 К. Несколько бóльшую плотность тока j_c наблюдали в проволочных образцах с Bi -керамикой [7-9].

Дальнейшие исследования показали, что критическая плотность тока в керамиках максимальна, если транспортный ток протекал параллельно плоскости ab кристаллической решетки. Поэтому создание в проводнике преимущественной ориентации кристаллитов, при которой ось c была бы перпендикулярна направлению транспортного тока, должно было привести к существенному увеличению токонесущей способности проводника. Одним из способов достижения такой направленности кристаллитов оказалась прокатка проволоки с сердечником из сверхпроводящей керамики в ленту. При этом зерна керамики выстраивались так, что ось c была перпендикулярна плоскости прокатки ленты. С уменьшением толщины h керамического сердечника критическая плотность тока монотонно повышалась, достигая максимума при $h \leq 0.1$ мм [10-16].

В настоящей работе исследовалось влияние величины деформации прокаткой μ на критическую плотность тока керамики $YBa_2Cu_3O_y$. Прокатке подвергалась проволока, состоящая из керамического сердечника и медной оболочки. Зависимости $j_c(\mu)$ сравнивались с аналогичными зависимостями плотности и данными рентгеновской дифрактометрии.

1. Получение образцов и методика исследования

Исходная заготовка, из которой получали проволоку, представляла собой цилиндрический медный стакан, заполненный порошком сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_7$ и закрытый сверху медной пробкой. Порошок состоял на 95 % из частиц размером от 4 до 7 мкм.

Порошок Y-керамики получали по трехстадийной технологии, включавшей в себя твердофазный синтез, восстановление в водороде и окисление в кислороде, из смеси порошков Y_2O_3 , CuO и BaO_2 .

Заготовка деформировалась вначале гидроэкструзией в пруток диаметром 10 мм, затем прокаткой в калибрах до диаметра 5 мм и последующим волочением. Конечный диаметр проволоки 2 мм. Далее проволока подвергалась плоской прокатке до различной толщины. Вся деформация осуществлялась при комнатной температуре.

Величина деформации плоской прокатной μ рассчитывалась по формуле

$$\mu = \ln \pi d_0^2 / 4S,$$

где

$$S = (b - h)h + \pi h^2 / 4 \approx bh,$$

d_0 — диаметр керамического сердечника в проволоке диаметром 2 мм, b и h — соответственно ширина и толщина плоского керамического сердечника.

Медная оболочка ленты удалялась травлением в азотной кислоте, а сердечник Y-керамики спекался в кислороде при $950^\circ C$ в течение 3 ч. Химическое травление оболочки, в процессе которого сердечник некоторое время находился в контакте с кислотой, не оказывало отрицательного влияния на сверхпроводящие свойства керамики [17].

Критическая плотность тока j_c измерялась резистивным методом при 77 К в нулевом магнитном поле. Таковые и потенциальные контакты из индия наносили на керамику с помощью ультразвукового паяльника. Критерий определения критического тока $\sim 1 \mu V/m$.

Плотность ρ керамики определялась методом гидростатического взвешивания.

Методом рентгеновской дифрактометрии в монохроматизированном характеристическом Mo-излучении исследовалась также текстура образцов. За характеристику последней принималось отношение β интенсивностей дифракции от ряда характерных линий, например $\beta = I(\{006\} + \{020\}) / I(\{1200\})$. Увеличение текстурного коэффициента β по сравнению с его теоретическим значением, равным 1.44 [18], свидетельствовало об увеличении статистического веса кристаллитов, в которых ось c была перпендикулярна плоскости прокатки ленты.

2. Эксперимент

Данные измерения критической плотности тока j_c после соответствующей математической обработки были представлены в виде зависимости j_c от величины деформации плоской прокаткой μ (рис. 1). На кривой $j_c(\mu)$ можно отметить два пологих максимума: при деформациях 0.15–0.20 ($j_c = 345 \pm 95 \text{ A/cm}^2$) и 0.85–1.05 ($j_c = 245 \pm 20 \text{ A/cm}^2$), что соответствовало интервалам толщин 0.6–0.9 и 0.13–0.20 мм.

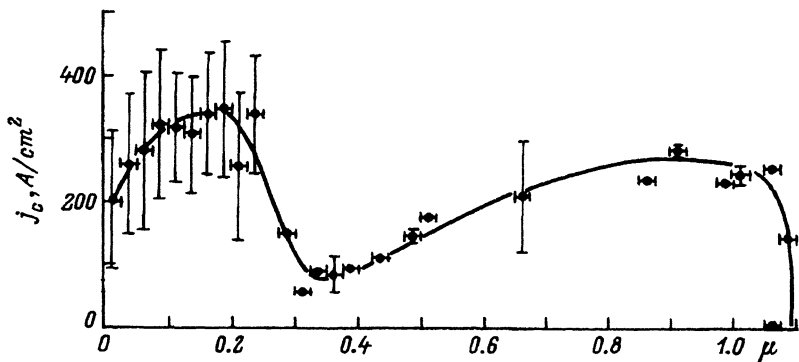


Рис. 1. Зависимость критической плотности тока j_c плоских образцов керамики $YBa_2Cu_3O_y$ от величины деформации прокаткой μ после спекания в O_2 при $950^\circ C$, 3 ч.

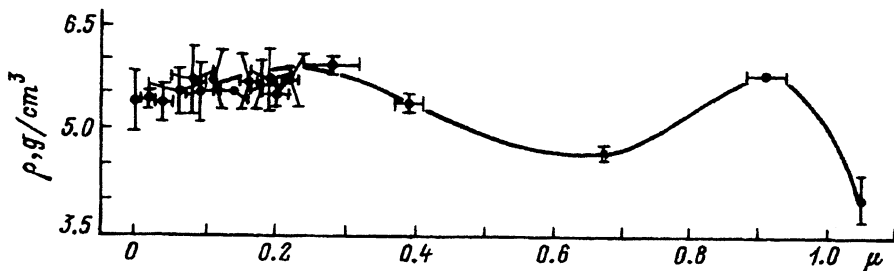


Рис. 2. Зависимость плотности ρ плоских образцов керамики $YBa_2Cu_3O_y$ от величины деформации прокаткой μ после спекания в O_2 при $950^\circ C$, 3 ч.

Аналогичная обработка экспериментальных результатов проведена в отношении плотности ρ плоских образцов Y -керамики (рис. 2). Изменение плотности по мере накопления деформации имело также немонотонный характер, причем максимумы ρ приходились на те же интервалы μ , что и максимумы на аналогичных зависимостях критической плотности тока. Наибольшие значения плотности составляли $5.8-6.0 \text{ g/cm}^3$.

Оказалось, что максимумам j_c и ρ соответствовали и наибольшие значения текстурного коэффициента β , равные 2.1 и 2.6 соответственно в области малых и больших деформаций прокаткой.

3. Обсуждение

Полученные зависимости критической плотности тока от величины деформации прокаткой (что и от толщины керамического сердечника) имели немонотонный характер. Это отличалось от известных в литературе данных [10-16], согласно которым плотность тока j_c с уменьшением толщины керамических образцов повышалась вплоть до толщины h , равной 0.1 мкм .

Различное поведение зависимостей $j_c(h)$ [или $j_c(\mu)$] можно объяснить различной плотностью сверхпроводящей керамики перед прокаткой. В настоящих экспериментах прокатке подвергалась проволока

диаметром 2 мм, в которой керамический сердечник имел достаточно высокую плотность вследствие предшествующей деформации проволоки гидроэкструзией, прокаткой в калибрах и волочением. Последующая плоская прокатка проволоки сначала вызывала повышение критической плотности тока, обусловленное, по-видимому, скорее некоторым уплотнением керамики, чем образованием текстуры, а затем — значительный спад j_c вследствие уменьшения плотности керамического сердечника.

В процессе плоской прокатки в области относительно малых величин μ деформация керамического сердечника происходила за счет хрупкого разрушения частиц порошка по плоскостям спайности и взаимного проскальзывания. С одной стороны, это вызывало вышеупомянутое падение плотности керамики, а с другой стороны, при дальнейшей деформации прокаткой форма таких частиц оказывалась благоприятной для их преимущественной ориентации осью с перпендикулярно плоскости прокатки ленты и более плотной упаковки. Последнее, вероятно, и проявилось в повторном увеличении ρ и втором максимуме j_c .

В цитируемых работах ленточные образцы получались волочением и последующей прокаткой трубки, заполненной порошком керамики. Исходная плотность керамического сердечника равнялась по существу насыпной плотности порошка, что составляло лишь $\sim 30\%$ от ее теоретического значения. В таком состоянии деформация керамического сердечника за счет взаимного проскальзывания и хрупкого разрушения частиц порошка могла происходить вместе с его уплотнением, что приводило к постепенному повышению критической плотности тока. Падение плотности и токонесущей способности происходило лишь при больших величинах деформации прокаткой и было вызвано, как и в исследуемых в данной работе образцах, нарушением сплошности сердечника.

Список литературы

- [1] Larbalesier D.C., Daeumling M., Lee P.J. et al. // *Cryogenics*. 1987. V. 27. N 8. P. 411–415.
- [2] Yamada Y., Fukushima N., Nakayama Sh. et al. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1987. V. 26. Pt 2. N 8. P. L865–L866.
- [3] Kohno O., Ikeno Y., Sadakata N. et al. // *Jap. J. appl. Phys.* 1987. V. 26. Pt 2. N 5. P. L759–L760.
- [4] Jin S., Sherwood R.C., van Dover R.B. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. N 3. P. 203–204.
- [5] Flükiger R., Müller T., Goldacker W. et al. // *Physica C*. 1988. V. 153–155. Pt 2. P. 1574–1579.
- [6] Löhle J., Mattenberger K., Vogt O., Wachter P. // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 68. N 2. P. 882–884.
- [7] Dou S.X., Liu H.K., Wang J. et al. // *Physica C*. 1990. V. 172. N 1–2. P. 63–70.
- [8] Zannella S., Tenbrink J., Heine K. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. N 2. P. 192–194.
- [9] Miller T.A., Ostenson J. E., Li Q. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1991. V. 58. N 19. P. 2159–2161.
- [10] Okada Michiya, Okayama Akira, Matsumoto Toshimi et al. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1988. V. 27. N 9. P. L1715–L1717.
- [11] Okada Michiya, Nishiwaki Ryou, Kamo Tomoichi et al. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1988. V. 27. N 12. P. L2345–L2347.
- [12] Kawashima M., Nagata M., Hosoda Y. et al. // *IEEE Trans. Magnet.* 1989. V. 25. N 2. P. 2168–2170.
- [13] Aihara Katsuzo, Okada Michiya, Okayama Akira et al. // *Powder and Powder Met.* 1988. V. 35. N 5. P. 325–328.

- [14] Torii Yasuko, Kugai Hirokazu, Takei Hiromi, Tada Kouji // Jap. J. Appl. Phys. 1990. V. 29. N 6. P. L952-L954.
- [15] Qi Z.W., Peng Q.Y., Long X.Y. et al. // Cryogenics. 1990. V. 30. N 9. P. 855-858.
- [16] Osamura Kozo, Oh Sang Soo, Ochiai Shojiro // Supercond. Sci. Technol. 1990. V. 3. N 3. P. 143-147.
- [17] Коржов В.П., Кулаков В.И. // ФММ. 1991. № 4. С. 163-168.
- [18] Johnson K.A., Staudhammer K.P., Medina W.J. et al. // Scripta Met. 1988. V. 22. N 10. P. 1689-1693.

Институт физики твердого тела РАН
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
11 апреля 1994 г.