

## НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОТЕРИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ДО $H_{c1}$

Д. Г. Андрианов, И. В. Матвеев, Е. А. Халявин, С. Б. Бугорский,  
И. П. Заутин, Ю. В. Мезенцев

Согласно модели Мелвилла [<sup>1, 2</sup>], проникновение магнитного поля  $H < H_{c1}$  в сверхпроводник с неидеальной поверхностью определяется ее микропрофилем. В силу концентрации силовых линий магнитного поля на выступах микропрофиля процесс проникновения магнитного потока развивается с острия выступа микронеровности вглубь до его основания. При этом поверхностный характер потерь сменяется объемным и за экспериментально измеренную величину  $H_{c1}$  принимается напряженность магнитного поля  $H$ , соответствующая проникновению магнитного потока до основания микронеровности (граница «поверхность»—«объем»). Поскольку магнитный поток проникает в поверхностные микронеровности в виде вихревых нитей (до достижения «объемного» значения  $H_{c1}$ ), испытывающих пиннинг, то поверхностные потери в модели Мелвилла являются гистерезисными, т. е. не зависят от частоты изменения поля (за цикл). Подобные представления о механизме поверхностных потерь подтверждаются экспериментальными данными для Nb [<sup>3</sup>]. Для высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) известны лишь измерения поверхностного импеданса [<sup>4, 5</sup>], выполненные в области СВЧ-частот и свидетельствующие о достаточно высоких значениях потерь.

В данной работе представлены результаты измерения низкочастотных электромагнитных потерь для ВТСП материалов методом низкотемпературной адиабатической калориметрии [<sup>3</sup>]. В применении к ВТСП материалам калориметр был модифицирован в расчете на малые значения переменных магнитных полей, ограниченных небольшой величиной  $H_{c1}$ , характерной для ВТСП. Чувствительность измерения электромагнитных потерь составила  $10^{-8}$  Вт на калориметр. Все измерения проводились при 4.2 К.

Исследования проводились на образцах иттриевой керамики цилиндрической геометрии. Образцы изготавливали в несколько этапов. Механическую смесь стехиометрических количеств оксидов иттрия, меди и углекислого бария термообработывали в воздушной атмосфере при температуре  $930 \pm 10$  °С в течение 10 ч, полученный продукт измельчали в планетарной мельнице. Фракцию порошка с характерными размерами ~30 мкм прессовали в жесткой прессформе при давлении  $1.5 \cdot 10^7$  кг/м<sup>2</sup>. Прессованные заготовки спекали в атмосфере воздуха при температуре 950—980 °С в течение 5—10 ч, далее заготовки охлаждали со скоростью 20—30 °С/ч до 300 °С, после чего печь отключали. Далее керамические заготовки шлифовали по образующей алмазным инструментом до  $\varnothing$  6 мм без применения охлаждающей жидкости. Несквозное коаксиальное отверстие под термометр изготавливали на токарном станке с помощью алмазных сверл. Фазовый состав образцов контролировали методом количественного рентгеновского анализа. Образцы содержали 98—100% (масс.) фазы  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Химический состав контролировали методом спектрального анализа на установке «Labtest».

В связи с тем что в мейсснеровской области амплитуд переменных магнитных полей потери мощности носят сугубо поверхностный характер, определяемые

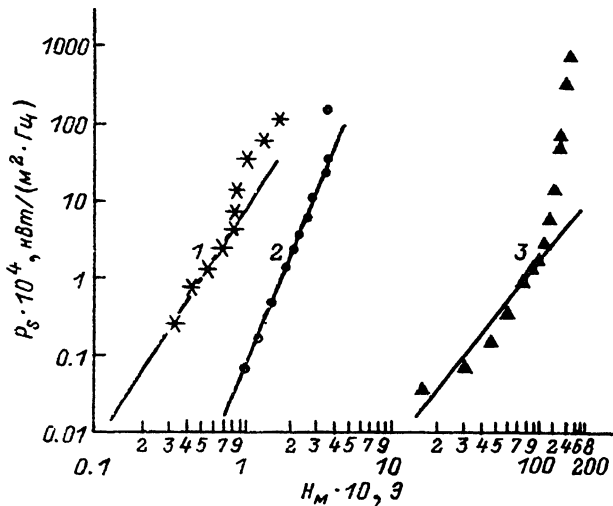


Рис. 1. Зависимость поверхностных потерь мощности  $P_s$  от амплитуды продольного магнитного поля  $H_M$  частотой 300 Гц для образца ВТСП и сверхпроводящего ниобия.

1 — исходный образец ВТСП, 2 — образец ВТСП после химического полирования его поверхности, 3 — полированный сверхпроводящий ниобий.

значения потерь нормировались на площадь поверхности образца. Величина потерь определялась в зависимости от амплитуды и частоты переменного магнитного поля.

На рис. 1 представлены полевые зависимости величины удельных потерь от амплитуды переменного поля частотой 300 Гц для образцов ВТСП в исходном состоянии (1) и после химического полирования поверхности в кипящем водном растворе 15% NaOH в течение 3 с (2). Здесь же приведена аналогичная зависимость для образца сверхпроводящего ниобия с полированной поверхностью. Величина  $H_{c1}$  регистрируется из этих кривых по характерному излому. Измеренные частотные зависимости потерь (200—20 000 Гц) показали, что для большинства образцов потери за цикл изменения поля практически не зависят от частоты, что свидетельствует о преимущественно гистерезисном характере диссипации. Вместе с тем на некоторых образцах воспроизводимо наблюдались аномалии частотной зависимости потерь, проявляющиеся в виде колоколообразного максимума различной амплитуды.

На рис. 2 для образца с полированной поверхностью показаны кривая намагничивания и результаты определения  $H_{c1}$  с помощью экстраполяции на нуль захваченного образцом магнитного потока  $\varphi$  при реверсировании внешнего магнитного поля. Известно, что определение  $H_{c1}$  из кривых намагничивания дает завышенные результаты [6]. Сравнение данных рис. 2 и результатов определения  $H_{c1}$  из калориметрических измерений (кривая 2 на рис. 1) подтверждает этот вывод и для ВТСП.

Таким образом, анализ экспериментальных результатов свидетельствует о гистерезисном характере потерь в мейснеровской области ВТСП материалов. Абсолютная величина потерь при  $H \approx 10$  Э колеблется от  $\approx 10^{-6}$  до  $7 \cdot 10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup>·Гц, что на 2—3 порядка превышает аналогичные потери для сверхпроводящего ниобия, полученные экстраполяцией на 10 Э (кривая 3 на рис. 1). Значение  $H_{c1}$  составляет 11 Э (4.2 К) для исходного образца и 36 Э (4.2 К) для полированного, что для данного состава ВТСП (Y—Ba—Cu—O) более чем на порядок ниже данных литературы [7—9], полученных в основном из кривых намагничивания.

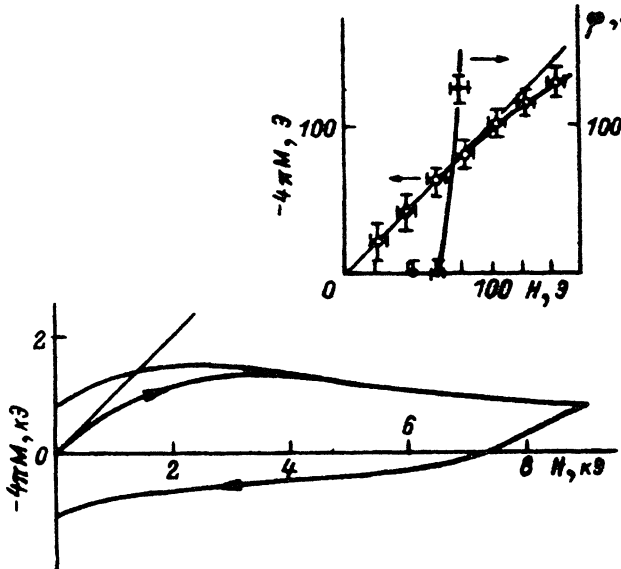


Рис. 2. Кривая намагничивания  $M(H)$  для образца ВТСИ.

На вставке — диамагнитная область  $M(H)$  и захват образцом магнитного потока  $\phi$  при реверсировании внешнего магнитного поля  $H$ . Из сопоставления графиков величина  $H_{C1}$  для данного образца оценивается  $60 \pm 20$  Э.

Работа выполнялась в рамках проекта № 152 Государственной программы «Высокотемпературная сверхпроводимость».

#### Список литературы

- [1] Melville P. H. // J. Physics C: Solid State Physics. 1971. V. 4. N 17. P. 2833—2848.
- [2] Melville P. H. // Advances in Physics. 1972. V. 21. N 92. P. 647—689.
- [3] Матвеев И. В., Халявин Е. А., Бугорский С. Б. // ПТЭ. 1986. № 6. С. 169—171.
- [4] Hein M., Müller G., Piel H. // J. Less-Comm. Metals. 1989. V. 151. N 1—2. P. 71—76.
- [5] Klein N., Chaloupka H., Mülleret G. et al. // J. Less-Comm. Metals. 1990. V. 164/165. Pt B. N 1—2. P. 1536—1543.
- [6] Матвеев И. В., Бугорский С. Б., Халявин Е. А. // Поверхность. 1988. № 3. С. 96—100.
- [7] Song S. N., Robinson Q., Johnson D. L., Ketterson J. B. // Sol. St. Comm. 1988. V. 68. N 4. P. 391—394.
- [8] Perez-Ramirez J. G., Baberschke K., Clark W. G. // Sol. St. Comm. 1988. V. 65. N 8. P. 845—848.
- [9] McGuire T. R., Dinger T. R., Freitas P. J. et al. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 7. P. 4032—4035.

Государственный  
научно-исследовательский и проектный  
институт редкометаллической промышленности  
«ГИРЕДМЕТ»  
Москва

Поступило в Редакцию  
11 июня 1991 г.  
В окончательной редакции  
18 ноября 1991 г.