

05.4;12

Температурная зависимость транспортных потерь в многожильных композитах на основе высокотемпературных сверхпроводников

© И.А. Руднев, А.Е. Ходот, А.В. Еремин, И.И. Акимов

Московский государственный инженерно-физический институт
(Технический университет), Москва

Поступило в Редакцию 2 февраля 1999 г.

При $T \geq 77$ К проведены измерения транспортных потерь на переменном токе в композитах $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в серебряной оболочке с числом жил $N = 19, 61, 127$. Обнаружено, что увеличение температуры приводит к росту транспортных потерь, зависящему от амплитуды рабочего транспортного тока. Показано, что рост транспортных потерь вызван уменьшением критического тока композитов.

В настоящее время многожильные композиты на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) могут рассматриваться как вероятные токонесущие элементы для трансформаторов и линий электропередачи. В качестве рабочего хладагента предполагается использовать жидкий азот. Как следствие, практически все исследования электрических потерь энергии в поле переменного транспортного тока (транспортные потери) проводятся при температуре $T = 77$ К [1–6]. Вместе с тем при реальной эксплуатации электротехнических систем с использованием ВТСП элементов возможны изменения рабочей температуры, вызванные либо конструктивными причинами, либо аварийными ситуациями. Поэтому важно знать характер изменения значения транспортных потерь при увеличении температуры и причины наблюдаемых явлений.

В настоящем сообщении представлены результаты измерений транспортных потерь в многожильных ленточных композитах $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в серебряной оболочке при различных температурах. Из проведенных исследований следует, что увеличение

температуры приводит к росту транспортных потерь, обусловленному падением величины критического тока I_c композитов.

Ленточные композиты $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x/\text{Ag}$ с числом жил $N = 19, 61$ и 127 изготавливали хорошо описанным в литературе методом "порошок в трубе" [7]. Характерные размеры измеряемых лент составляли $0.1 \div 0.2 \times 3 \div 4 \times 30 \text{ mm}$ при отношении ВТСП к серебру $\sim 20 : 80$. В эксперименте измерялась синфазная компонента первой гармоники напряжения на исследуемом образце в зависимости от амплитуды переменного транспортного тока различной частоты. Напряжение на каждой из частот определяли с использованием селективного усилителя. Индуктивная компонента напряжения компенсировалась с использованием трансформаторной петли в токовой цепи. Мощность полных транспортных потерь определяли как произведение синфазного тока и напряжения. Частота переменного тока задавалась генератором синусоидального сигнала, затем ток усиливался с помощью усилителя низкой частоты и трансформатора. Потенциальные выводы имели форму петли размером в $1.5-2$ ширины ленты и располагались в плоскости ленты [5,8]. Критический ток измерялся стандартным четырехконтактным методом по критерию $1 \mu\text{V}/\text{cm}$. При $B = 0$ и $T = 77 \text{ K}$ I_c для разных образцов был в интервале от 12 до 19 A . Критическая температура $T_c = 110.5 \text{ K}$. Экспериментальная установка позволяла изменять температуру композитов от 77 до 95 K с шагом в 1.5 K и поддерживать ее требуемое время с точностью до 0.5 K . При каждой температуре измерялись вольт-амперные характеристики на постоянном и переменном токе.

Все исследованные образцы показали качественно одинаковые результаты, поэтому в силу краткости сообщения мы приводим характерные кривые, полученные для композита с $N = 61$ при частоте транспортного тока $f = 330 \text{ Hz}$.

На рис. 1 представлены зависимости мощности удельных потерь (нормированных на длину образца) за цикл от амплитуды транспортного тока $Q(I)$ при разных T . Видно, что при фиксированной амплитуде тока увеличение температуры приводит к росту потерь. Причем чем выше рабочая амплитуда тока, тем сильнее относительное увеличение потерь.

Чем же определяется рост транспортных потерь? Расчеты транспортных потерь, проведенные для композитов различной ориентации, показывают, что зависимости потерь от нормированной амплитуды транспортного тока $\beta = I/I_c$ хорошо описываются уравнениями Норриса

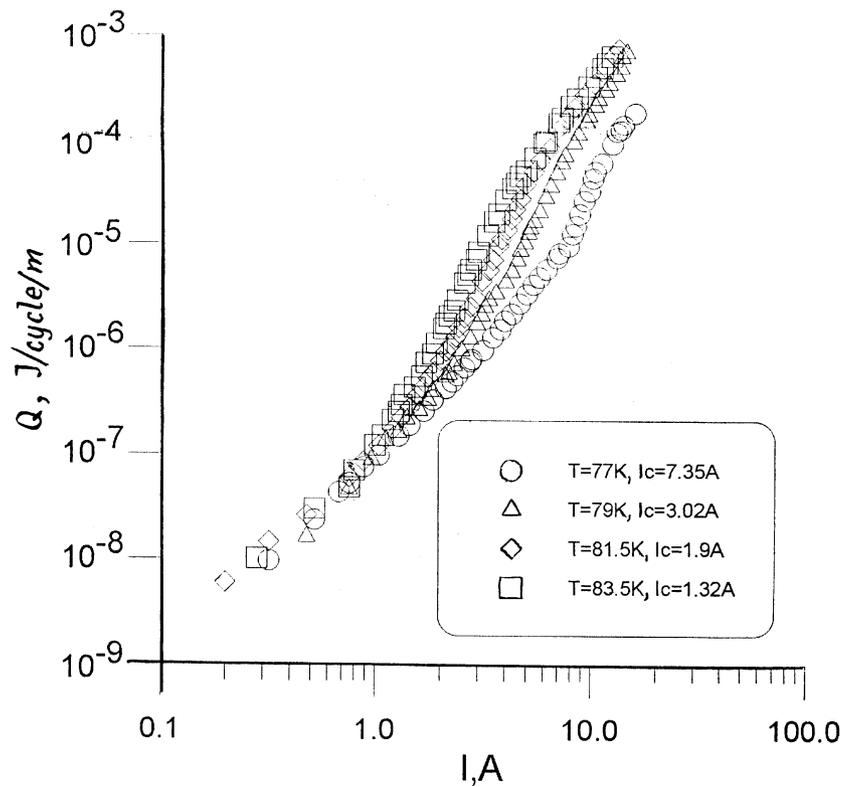


Рис. 1. Зависимость удельных транспортных потерь, нормированных на цикл от β .

(1) и (2), полученными для случаев эллиптического и прямоугольного сечений соответственно [9]:

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left[(2 - \beta) \frac{\beta}{2} + (1 - \beta) \ln(1 - \beta) \right], \quad (1)$$

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left[(1 + \beta) \ln(1 + \beta) + (1 - \beta) \ln(1 - \beta) - \beta^2 \right]. \quad (2)$$

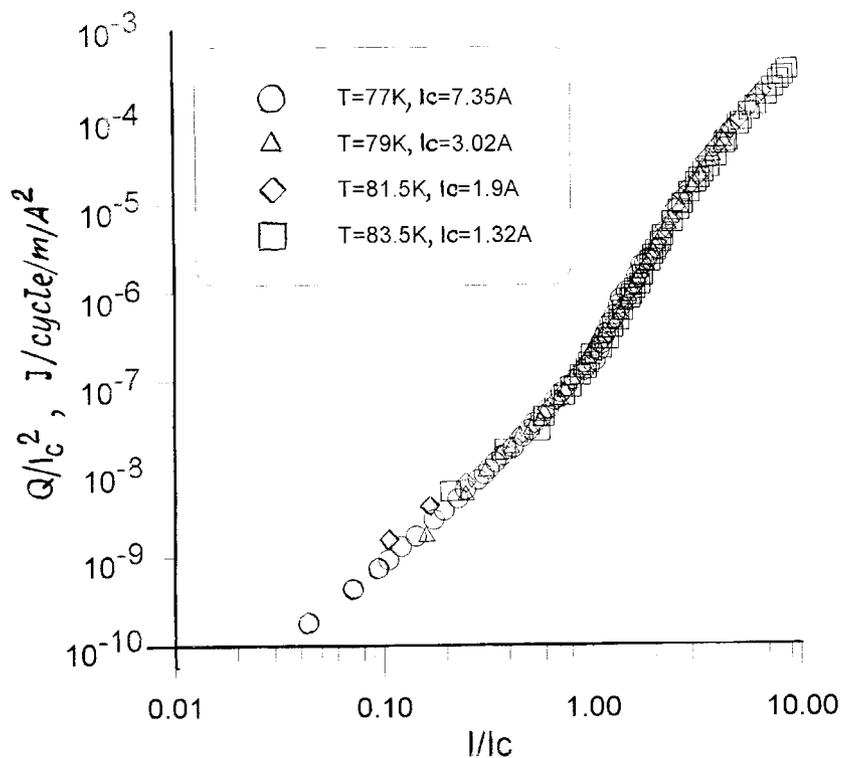


Рис. 2. Зависимость $Q/I_c^2(\beta)$ для композита с $N = 61$.

В частности, из (1) и (2) следует, что величина потерь при фиксированном β определяется только критическим током и что Q/I_c^2 — значение потерь, нормированных на квадрат критического тока, является общей функцией от β для заданной геометрии. На рис. 2 показана зависимость $Q/I_c^2(\beta)$, построенная на основании измеренных величин Q и I_c при разных температурах. Видна универсальность кривой $Q/I_c^2(\beta)$. Последнее указывает на то, что изменения в величине потерь при росте температуры определяются падением I_c композитов.

Таким образом, экспериментально показано, что влияние температуры на величину транспортных потерь сводится к уменьшению критического тока исследуемых композитов, аналогично влиянию внешнего постоянного магнитного поля [6]. Отметим, что потери по своему характеру являются так называемыми "потерями в насыщенной зоне", которые в отличие от гистерезисных потерь увеличиваются с уменьшением I_c .

Работа выполнена при поддержке Научного совета АНФКС, подпрограмма "Сверхпроводимость", проект № 99011.

Список литературы

- [1] *Awan S.A., Sali S., Friend C.M.* et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercon. 1997. V. 7. N 2. P. 335–338.
- [2] *Fukumoto Y., Wiesmann H.J., Garber M.* et al. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. N 7. P. 4584–4590.
- [3] *Kwasnitza K., Clerc St.* // Physica C. 1994. V. 233. N 3–4. P. 423–435.
- [4] *Oota A., Fukunaga T., Matsui M.* et al. // Physica C. 1995. V. 249. P. 157–165.
- [5] *Fukunaga T., Itou T., Oota A.* et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercon. 1997. V. 7. N 2. P. 1666–1669.
- [6] *Руднев И.А., Ходот А.Е., Еремин А.В., Акимов И.И.* // ФНТ. 1999. Т. 25. № 2. С. 141–147.
- [7] *Niculin A.D., Shikov A.K., Akimov I.I.* et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercon. 1997. V. 7. N 2. P. 2094–2097.
- [8] *Campbell A.M.* // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1995. V. 5. N 2. P. 682–688.
- [9] *Norris W.T.* // J. Phys. D. 1970. V. 3. P. 489–507.