

Электрические потери на переменном токе в многожильных лентах $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x/\text{Ag}$

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

*Московский государственный инженерно-физический институт (Технический университет),
Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31
E-mail: rudnev@supercon.mephi.ru*

И. И. АКИМОВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара,
Россия, 123479, г. Москва, ул. Рогова, 5
E-mail: postmaster@vniinm402.msk.su*

Статья поступила в редакцию 27 июля 1998 г., после переработки 14 сентября 1998 г.

Представлены результаты измерений электрических потерь в ленточных многожильных ВТСП композитах с числом жил $N = 7, 19, 37, 61, 91, 127, 169, 703$ на переменном транспортном токе. Измерения проведены как в собственном поле тока, так и во внешнем постоянном магнитном поле с различной ориентацией относительно плоскостей лент. Получены зависимости мощности потерь от амплитуды и частоты переменного транспортного тока. Показано, что для всех изученных лент зависимость потерь от амплитуды тока согласуется с теоретическими выражениями Норриса для случаев либо эллиптического, либо прямоугольного сечения провода. Обнаружено, что внешнее магнитное поле увеличивает величину потерь. Сделан вывод о том, что потери на транспортном токе в многожильных ВТСП композитах являются потерями в «насыщенной зоне».

Подано результати вимірювань електричних втрат в стрічкових багатожильних ВТСП композитах з числом жил $N = 7, 19, 37, 61, 91, 127, 169, 703$ на змінному транспортному струмі. Вимірювання виконано як у власному полі струму, так і в зовнішньому постійному магнітному полі з різною орієнтацією відносно площин стрічок. Одержано залежності потужності втрат від амплітуди та частоти змінного транспортного струму. Показано, що для усіх вимірюваних стрічок залежність втрат від амплітуди та частоти струму узгоджується з теоретичними виразами Норріса у випадку еліптичного або прямокутного перерізу проводу. Знайдено, що зовнішнє магнітне поле збільшує величину втрат. Зроблено висновок про те, що втрати при транспортному струмі в багатожильних ВТСП композитах є втратами в «насиченій зоні».

PACS: 74.25.Fy, 74.25.Nf, 74.72.Hs, 74.72.Lw, 85.25.-j

Введение

Широкой областью перспективного технического применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) являются различные электротехнические системы, требующие высоких плотностей электрического тока. Кабели для передачи электрической энергии, электромагниты постоянного и переменного поля, трансформаторы — вот те приложения, в которых ВТСП могут быть успешно использованы. К сожалению, применению ВТСП в реальных электротехнических устройствах пока препятствует ряд факторов, которые нуждаются в оптимизации. Прежде всего это

низкая механическая прочность и невысокая плотность критического тока. Не менее важным является отклик ВТСП на внешнее переменное электромагнитное поле, или потери энергии в переменном поле, в том числе создаваемом собственным транспортным током (транспортные потери).

В ряде электротехнических систем сверхпроводник с переменным транспортным током помещается во внешнее магнитное поле различной пространственной конфигурации. Поэтому важно знать влияние магнитного поля на величину транспортных потерь в реальных ВТСП лентах. Но оно практически не изучено, несмотря на интенсивные исследования транспортных потерь в

одножильных [1–4] и многожильных [5–9] лентах. Экспериментальные данные в [1–9] хорошо описываются моделью критического состояния, созданной для традиционных низкотемпературных сверхпроводников. Потери в собственном поле определяются выражением, полученным из теории Лондонов для провода круглого сечения [10]. Решения для эллиптического и прямоугольного сечений найдены Норрисом [11]. Эти модели основывались на предположении, что плотность критического тока не зависит от магнитного поля и сверхпроводник изотропен относительно его электромагнитных свойств. Рассмотренные модели не были предназначены для описания поведения транспортных потерь в магнитном поле неоднородных многожильных композитов. Тем не менее с помощью выражений Норриса были успешно объяснены результаты экспериментальной работы [12], посвященной изучению влияния магнитного поля на величину транспортных потерь в одно- и 37-жильных ВТСП композитах.

В настоящей работе представлены результаты исследований 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 (Bi-2223/Ag) в присутствии внешнего магнитного поля различной ориентации относительно плоскости ленты. Рассматривается набор из 8 лент с числом жил от 7 до 703. Из проведенных измерений следует, что магнитное поле изменяет транспортные потери только через изменение критического тока сверхпроводника в магнитном поле. Так же, как и в [12], наши данные успешно объясняются моделью Норриса. Кроме того, показано, что транспортные потери в ВТСП композитах являются не чистыми гистерезисными потерями, а потерями в «насыщенной зоне», так же как для случая традиционных низкотемпературных сверхпроводящих проводов. Главное отличие этих видов потерь заключается в том, что потери в «насыщенной зоне» уменьшаются с увеличением критического тока. Гистерезисные потери определяются площадью петли намагниченности сверхпроводника и возрастают с увеличением критического тока.

Образцы и методика измерений

Ленточные композиты $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ с числом жил $N = 7, 19, 37, 61, 91, 127, 169$ и 703 изготавливали хорошо описанным в литературе методом «порошок в трубе» [13]. Характерные размеры лент составляли $0,1-0,2 \times 3-4 \times 30$ мм при отношении ВТСП к серебру $\sim 20:80$.

В эксперименте измерялась синфазная компонента первой гармоники напряжения на исследуе-

мом образце в зависимости от амплитуды переменного транспортного тока различной частоты. Напряжение на каждой из частот измеряли с помощью селективного усилителя. Индуктивная компонента напряжения компенсировалась с использованием трансформаторной петли в токовой цепи. Произведение синфазного тока и напряжения давало мощность полных транспортных потерь. Частотные и амплитудные зависимости потерь определяли в диапазоне $30 \text{ Гц} < f < 150 \text{ Гц}$ при $I < 30 \text{ А}$ соответственно по частоте и амплитуде тока. Частота переменного тока задавалась генератором синусоидального сигнала, затем ток усиливался с помощью усилителя низкой частоты и трансформатора. Во избежание возможных помех от промышленной электросети используемая частота переменного транспортного тока и ее первые гармоники не были кратны 50 Гц.

Как было отмечено в [9,14,15], величина потерь, измеряемых в ВТСП лентах, сильно зависит от расположения на образце потенциальных контактов. Для получения «правильного» значения потерь (т.е. независимого от положения контактов) потенциальные выводы должны иметь форму петли размером в 1,5–2 ширины ленты и располагаться в плоскости ленты [16–18]. В наших экспериментах были выполнены все требования «правильного» расположения потенциальных зондов.

Критический ток измерялся стандартным четырехконтактным методом по критерию 1 мкВ/см. Ток I_c при нулевом магнитном поле и $T = 77 \text{ К}$ для разных образцов был в интервале от 12 до 19 А (таблица). Также в таблице представлены значения удельных потерь на цикл при $I = I_c$ и удельных потерь, нормированных на квадрат критического тока.

Таблица

Значения критических токов и нормированных потерь

N	$I_c, \text{ А}$	$Q, 10^{-6} \text{ Вт/цикл}\cdot\text{м}$ ($I = I_c$)	Q/I_c^2 ($I = I_c$)
	$T = 77 \text{ К}, B = 0$		
7	14,8	12,4	0,05
19	13,3	13,1	0,07
37	12,1	11,6	0,08
61	14,1	11,6	0,06
91	13,7	9,8	0,05
127	13,6	9,8	0,05
169	19,0	8,3	0,02
703	18,6	20,0	0,05

При измерениях во внешнем магнитном поле образцы помещались в специальную магнитную систему таким образом, чтобы угол α между на-

правлением магнитного поля и плоскостью образца можно было варьировать от 0 до 360° с шагом 5°. Угол между направлениями магнитного поля и тока всегда составлял 90°. Величина магнитного поля контролировалась по току через магнитную систему. В магнитном поле потери измерялись в зависимости от амплитуды переменного тока при частоте $f = 33$ Гц, разных углах α и нескольких значениях магнитного поля. Также было определено значение критического тока для каждого угла α при всех величинах магнитного поля. Все эксперименты проводились при $T = 77$ К.

Экспериментальные результаты

Транспортные потери в собственном поле тока

На рис. 1 представлены примеры зависимости мощности удельных потерь W (на единицу длины провода) от $\beta = I/I_c$ — амплитуды транспортного тока, нормированного на величину критического тока при нулевой частоте (т.е. критический ток на постоянном токе) для композитов с различным числом жил N . При токах меньше критического, т.е. при $\beta < 1$, наблюдаются различия в зависимостях для разных частот, в то время как при $\beta \geq 1$ зависимости $W(\beta)$ совпадают. Действительно, при $I > I_c$ образцы находятся в нормальном состоянии, когда мощность потерь не зависит от частоты. Однако зависимости $W(\beta)$ не совпадают при $\beta = 1$. Это может быть связано с сильно размытым переходом по току из сверхпроводящего состояния в нормальное (с вольт-амперной характеристикой), что приводит к известной условности в практическом определении критического тока по фиксированному порогу напряжения. Кроме

того, несовпадение зависимостей $W(\beta)$ при $\beta = 1$ возможно из-за различий межгранульного и внутрigrанульного критических токов. На рис. 1, а, б видно, что частотная зависимость исчезает примерно при амплитуде тока, в два раза превышающей значение критического тока. Для таких амплитуд тока все данные асимптотически приближаются к общей кривой $W \sim \beta^2$, характеризующей нормальное омическое поведение проводника.

Пример зависимости удельных потерь энергии на цикл Q от β при разных частотах представлен на рис. 2 для 127-жильного образца. Все образцы характеризуются практически одинаковым поведением $Q(\beta)$, описываемым степенной функцией $Q \sim \beta^n$, где $n = 3-4$ при малых β .

Как было показано Норрисом [11], зависимость $Q(\beta)$ при $\beta < 1$ для случаев эллиптического и прямоугольного сечений проводника дается следующими уравнениями:

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

и

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

Для малых β уравнения сводятся соответственно к

$$Q \approx \mu_0 I^3 / 6\pi I_c \quad (3)$$

и

$$Q \approx \mu_0 I^4 / 6\pi I_c^2, \quad (4)$$

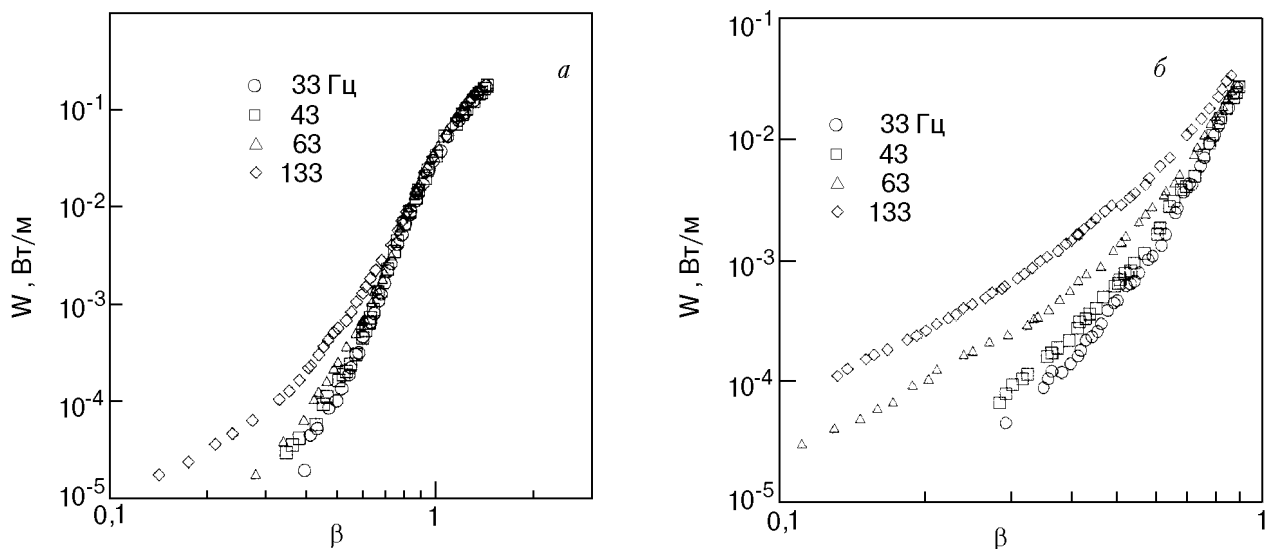


Рис. 1. Мощность удельных транспортных потерь в зависимости от нормированной амплитуды транспортного тока $\beta = I/I_c$ при различных частотах для композитов с $N = 37$ (а) и 169 (б).

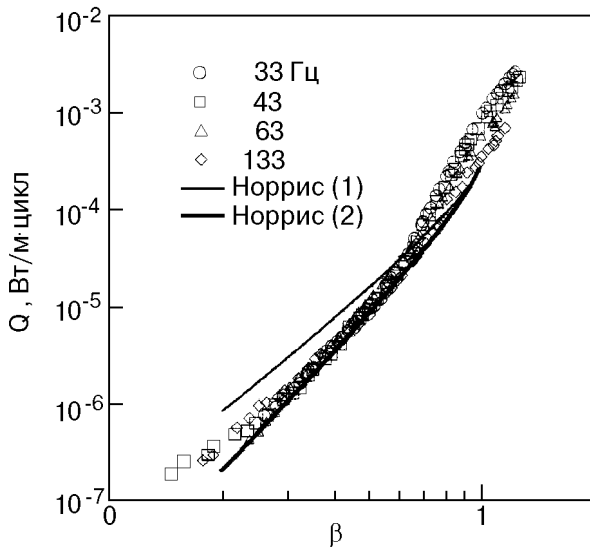


Рис. 2. Зависимости удельных транспортных потерь, нормированных на цикл, от $\beta = I/I_c$ при различных частотах.

а при $\beta = 1$ приближаются к

$$Q = 0,16\mu_0 I_c^2 \quad (5)$$

и

$$Q = 0,12\mu_0 I_c^2 \quad (6)$$

Результаты наших экспериментов соответствуют как зависимостям (1), так и (2) для разных композитов. Возможно, это связано с тем, что поперечное сечение лент не является в точности ни прямоугольным, ни эллипсоидным.

Выбрав постоянное значение $\beta \neq 1$, можно построить частотные зависимости потерь. При этом целесообразно использовать значение полных потерь, так как функциональный характер их зави-

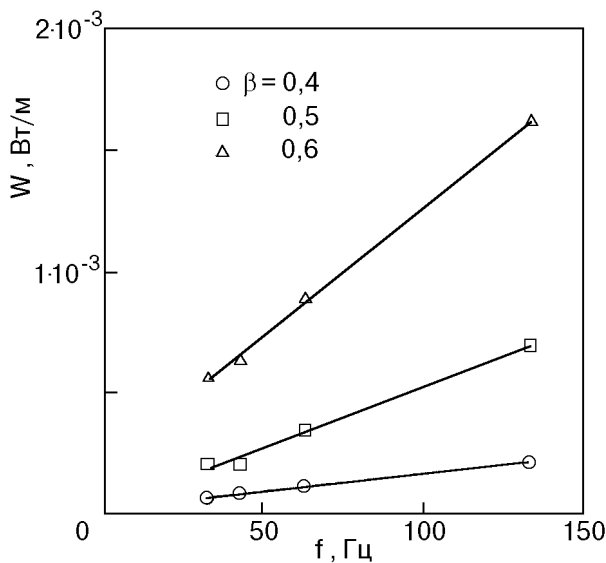


Рис. 3. Зависимости удельных транспортных потерь от частоты для композита с $N = 7$ при различных значениях β .

симости от частоты определяется типом источников. Как уже отмечалось, омические потери от частоты не зависят. Они реализуются в случаях, когда либо образец находится в нормальном состоянии, либо ток протекает по серебряной матрице. Гистерезисные потери, присутствующие в сверхпроводящем материале, растут с увеличением частоты линейно, и, наконец, потери на вихревые токи в серебряной матрице пропорциональны квадрату частоты.

Для всех образцов мы наблюдали линейную зависимость, что указывает на гистерезисный характер потерь. На рис. 3 изображена зависимость удельных транспортных потерь от частоты для композита с $N = 7$.

Влияние внешнего магнитного поля

На рис. 4 показана угловая зависимость критического тока I_c (приведенного к I_{c0} при $B = 0$) при различных значениях внешнего магнитного поля B для композита с $N = 61$. Угол $\alpha = 90^\circ$ соответствует перпендикулярной конфигурации (поле перпендикулярно плоскости ленты). Зависимости I_c/I_{c0} от внешнего магнитного поля при $\alpha = 0, 40, 60, 90^\circ$ представлены на рис. 5. Для поля, приложенного перпендикулярно плоскости ленты, критический ток уменьшается значительно быстрее, чем при параллельной конфигурации.

Влияние внешнего магнитного поля на величину потерь показано на рис. 6, где для композита с $N = 61$ удельные транспортные потери представлены как функция амплитуды тока при разных магнитных полях перпендикулярной и параллельной конфигураций. Магнитное поле значительно

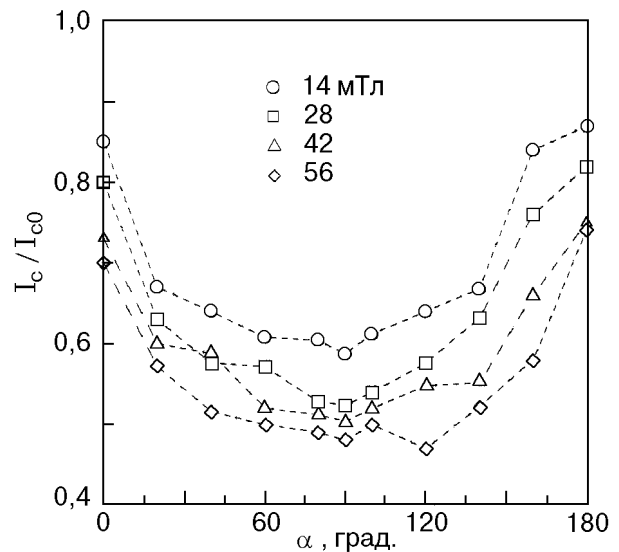


Рис. 4. Угловые зависимости нормированного критического тока при различных значениях внешнего магнитного поля для композита с $N = 61$.

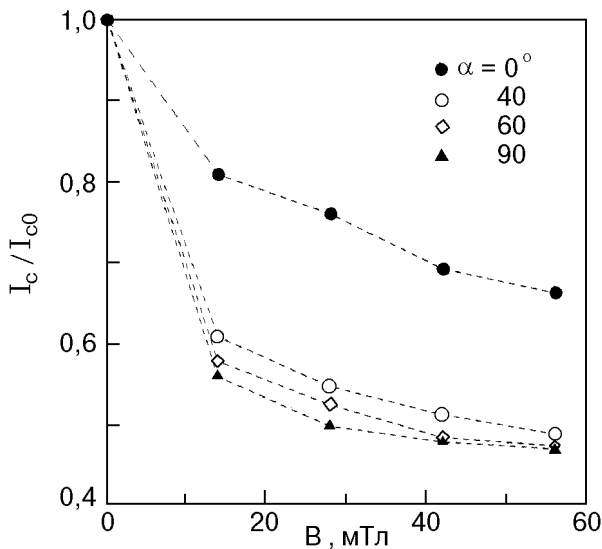


Рис. 5. Зависимости нормированного критического тока от магнитного поля различной ориентации.

увеличивает величину потерь. Угловая зависимость транспортных потерь приведена на рис. 7. Поскольку величина и направление магнитного поля одновременно меняют и значение критического тока, и величину потерь, интересно построить зависимость величины потерь от I_c . Пример такой зависимости представлен на рис. 8 (критический ток нормирован на I_{c0} при $B = 0$). Видно, что все экспериментальные данные легли на общую кривую, причем с уменьшением критического тока потери возрастают.

Обсуждение экспериментальных результатов

Попробуем ответить на вопрос: какой тип потерь наблюдается в исследуемых композитах и

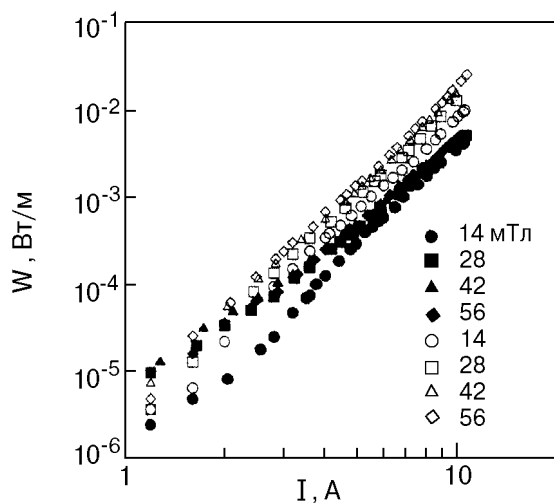


Рис. 6. Удельные транспортные потери как функция амплитуды тока при разных значениях магнитного поля. Полые и зачерненные символы соответствуют направлению поля перпендикулярно и параллельно плоскости ленты.

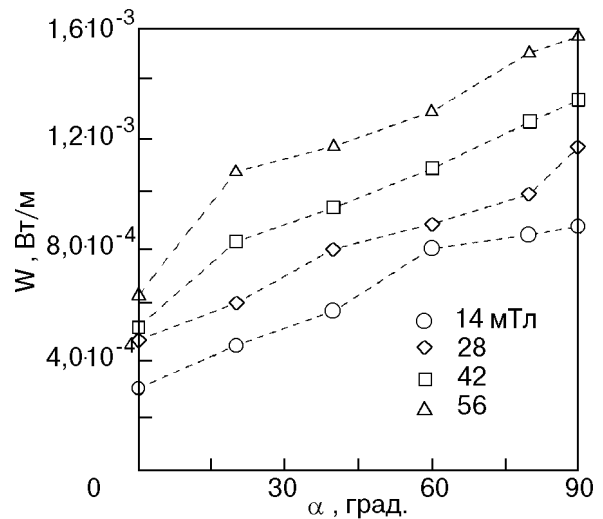


Рис. 7. Угловые зависимости транспортных потерь при различных значениях внешнего магнитного поля для композита с $N = 61$.

как оценить возможные значения потерь? Обобщим экспериментальные результаты:

- зависимость транспортных потерь на цикл от тока, $W \sim I^n$, где $n = 3-4$;
- зависимость потерь от частоты — линейная;
- при увеличении критического тока транспортные потери уменьшаются;
- с увеличением магнитного поля потери растут.

Из этих результатов следует, что, как и в случае традиционных низкотемпературных сверхпроводников, транспортные потери в ВТСП композитах являются потерями в «насыщенной зоне» (см., например, [17]). Чем же характерны потери в «насыщенной зоне» и чем они отличаются от гистерезисных потерь? Известно [17], что ток в

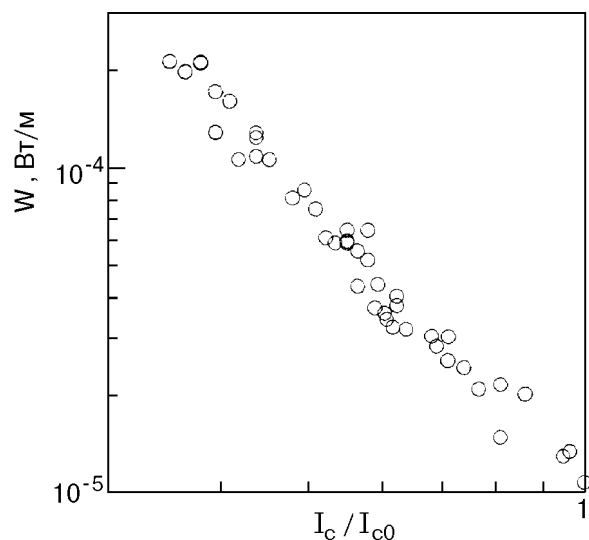


Рис. 8. Зависимость транспортных потерь от величины критического тока для композита с $N = 19$.

сверхпроводящем композите протекает вблизи поверхности проводника, занимая все большую область по мере увеличения значения транспортного тока. В этой области, называемой «насыщенной зоной» («насыщенным слоем», «насыщенной областью»), плотность тока равна критическому значению. Именно в «насыщенной зоне», а не во всем объеме сверхпроводника происходит выделение мощности на переменном токе. В насыщенной области потери имеют гистерезисный характер. Однако объем насыщенного слоя при фиксированной амплитуде тока зависит от значения критического тока. Чем выше I_c , тем меньше объем насыщенной области и соответственно меньше общее значение потерь. Для «чистых» гистерезисных потерь характерно другое поведение. При увеличении критического тока гистерезисные потери растут, так как определяются петлей намагниченности сверхпроводника.

Потери в насыщенном слое хорошо описываются уравнениями Норриса (1) и (2). В частности, из них следует, что Q/I_c^2 — значение потерь, нормированное на I_c^2 , является общей функцией для данной геометрии. На рис. 9 показана экспериментальная зависимость Q/I_c^2 от β , где и потери, и критический ток изменяются под действием магнитного поля. Видно, что, как и предсказывалось, все данные легли на общую кривую. Очень похожее поведение потерь, но под действием температуры в одножильной ленте Ag/Bi-2223 было недавно отмечено в [18]. Более того, нормировка потерь при $I = I_c$ (т.е. когда весь проводник находится в насыщенном состоянии) на квадрат критического тока дает близкие величины для всех исследованных лент (см. таблицу). Из формул Норриса (5) и (6) при $\beta = 1$ можно оценить верх-

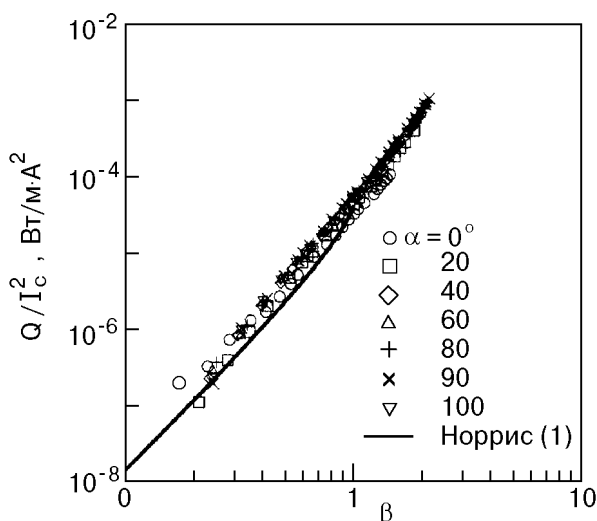


Рис. 9. Зависимости Q/I_c^2 (β) для композита с $N = 61$ при различной ориентации магнитного поля.

ний предел транспортных потерь. Как уже отмечалось, расчетные значения транспортных потерь могут отличаться от реальных в силу неоднозначности определения критического тока по размытой вольт-амперной характеристике.

Заключение

Результаты измерений потерь на переменном транспортном токе в многожильных Bi-2223/Ag сверхпроводящих лентах во внешнем магнитном поле показали, что они являются потерями в «насыщенной зоне», которые отличаются от «чистых» гистерезисных. Потери в насыщенной зоне увеличиваются с уменьшением критического тока, что наблюдалось в эксперименте. Внешнее постоянное магнитное поле вызывает увеличение потерь, коррелируя с уменьшением критического тока в исследованных образцах. Значения транспортных потерь, нормированных на квадрат критического тока Q/I_c^2 , как функция нормированной амплитуды транспортного тока ложатся на одну кривую в соответствии с уравнениями Норриса.

Работа выполнена при поддержке Научного совета ГНТП «Актуальные направления в физике конденсированных сред», подпрограмма «Сверхпроводимость», проект № 95019.

1. M. N. Pitsakis, T. Haugan, F. C. H. Wong, S. Patel, and D. T. Shaw, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 4584 (1995).
2. S. P. Ashworth, *Physica* **C229**, 355 (1994).
3. Y. Yang, T. Hughes, C. Beduz, D. M. Spiller, R. G. Scurlock, and W. T. Norris, *Physica* **C256**, 378 (1996).
4. M. Cizek, B. A. Glowacki, S. P. Ashworth, A. M. Campbell, W. Y. Liang, R. Flukiger, and R. E. Gladyshevskii, *Physica* **C260**, 93 (1996).
5. S. A. Awan, S. Sali, C. M. Friend, and T. P. Beales, *IEEE Trans. on Appl. Supercon.* **7**, 335 (1997).
6. Y. Fukumoto, H. J. Wiesmann, M. Garber, M. Suenaga, and P. Haldar, *J. Appl. Phys.* **78**, 4584 (1995).
7. K. Wasnita and St. Clerc, *Physica* **C233**, 423 (1994).
8. A. Oota, T. Fukunaga, M. Matsui, S. Yuhya, and M. Hiraoka, *Physica* **C249**, 157 (1995).
9. T. Fukunaga, T. Itou, A. Oota, J. Maeda, and M. Hiraoka, *IEEE Trans. on Appl. Supercon.* **7**, 1666 (1997).
10. H. London, *Phys. Lett.* **6**, 162 (1963).
11. W. T. Norris, *J. Phys.* **D3**, 489 (1970).
12. M. Cizek, B. A. Glowacki, A. M. Campbell, A. P. Ashworth, W. Y. Liang, P. Haldar, and V. Selvamaniakam, *IEEE Trans. on Appl. Supercon.* **7**, 314 (1997).
13. A. D. Niculin, A. K. Shikov, I. I. Akimov, E. V. Antipova, F. V. Popov, and D. A. Silichev, *IEEE Trans. on Appl. Supercon.* **7**, 2094 (1997).
14. T. Fukunaga, S. Maruyama, and A. Oota, *Adv. in Superconductivity VI*, Springer-Verlag, Tokyo (1994), p. 633.
15. M. Cizek, A. M. Campbell, and B. A. Glowacki, *Physica* **C233**, 203 (1994).
16. A. M. Campbell, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **5**, 682 (1995).
17. T. Pe, J. McDonald, and J. R. Clem, *Proc. Polish-U. S. Conf. on HTC*, Springer-Verlag (1995).

18. М. Унлсон, *Сверхпроводящие магниты*, Мир, Москва (1985).
19. Y. Yang, T. Hughes, C. Beduz, D. M. Spiller, R. G. Scurlock, and W. T. Norris, *Physica* **C256**, 378 (1996).

AC transport losses in multifilamentary
 $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x/\text{Ag}$ tapes

I. A. Rudnev, A. E. Khodot, A. V. Eremin, and
I. I. Akimov

The results of ac transport loss measurements are presented for 7, 19, 37, 61, 91, 127, 169, 703 –

filamentary Bi-2223/Ag tapes. The measurements have been carried out both in self-field conditions and in the external magnetic field applied to the tape at the different angles. The dependences of the ac losses on the current amplitude and frequency have been obtained. It is found that for all tapes the current amplitude dependences of the ac losses show good agreement with the Norris prediction for an elliptical or strip geometry. It was found that the increase in the external magnetic field results in an increase of ac transport losses only through the change of the critical current. So the transport ac losses in the tapes are the «saturation losses» that are different from classic hysteresis losses.