

05.4

## Увеличение терромагнитной устойчивости комбинированных сверхпроводников с добавками веществ, обладающих экстремально высокой теплоемкостью

© В.Е. Кейлин, И.А. Ковалев, С.Л. Круглов,  
Д.Э. Лупанов, В.И. Щербаков

РНЦ „Курчатовский институт“, Москва  
E-mail: krus@issssph.kiae.ru

Поступило в Редакцию 13 августа 2007 г.

Исследовалось влияние легирования комбинированных сверхпроводников соединениями из редкоземельных металлов, обладающих экстремально высокой теплоемкостью при низких температурах, на терромагнитную стабильность этих сверхпроводников (т.е. на устойчивость к скачкам магнитного потока). Были изготовлены три трубчатых образца, на которых исследовалось экранирование их центральной области от внешнего, изменяющегося со временем магнитного поля. Исследовалась зависимость величины скачка магнитного потока от скорости изменения внешнего магнитного поля. Обнаружено, что по сравнению с контрольным образцом без высокотеплоемких добавок у образца с внесенным в него интерметаллидом  $\text{HoCu}_2$  поле скачка увеличилось на 20%, а у образца с керамикой  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  — на 31%.

PACS: 74.62.Dh, 74.25.Sv, 74.70.Ad

В нашей предыдущей работе [1] было продемонстрировано значительное повышение стабильности комбинированных сверхпроводников с внутренним легированием некоторыми соединениями редкоземельных металлов (интерметаллиды  $\text{HoCu}_2$ ,  $\text{PrB}_6$ ,  $\text{CeCu}_6$ ,  $\text{CeAl}_2$  и керамикой  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ), обладающими чрезвычайно высокими удельными теплоемкостями при низких температурах. Например, у  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  удельная объемная теплоемкость при 4.2 К больше, чем у меди, в 600 раз.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения высокотеплоемких добавок (ВД) для повышения терромагнитной стабильности сверхпроводников, т.е. их устойчивости к скачкам магнитного потока (в дальнейшем — скачкам). Инициирование скачков

в проводниках сверхпроводящих магнитов может возникать благодаря механическому, тепловому или электромагнитному взаимодействию витков.

Внедрение ВД в сверхпроводник может повысить терромагнитную стабильность, если время скачка сравнимо или больше характерного времени температурной диффузии поперек сверхпроводника (времени его прогрева). Скачок обусловлен двумя взаимодействующими процессами диффузии — температуры и магнитного потока. Следовательно, он развивается медленнее самого быстрого из них. Если  $l$  — характерный поперечный размер проводника, а  $D_t$  и  $D_m$  — коэффициенты температурной и магнитной диффузии, то характерные времена диффузии температуры и магнитного потока  $t_h = l^2/D_t$  и  $t_m = l^2/D_m$ . Тогда если  $t_j$  — время развития терромагнитной неустойчивости, то для жестких сверхпроводников  $t_j > t_m$ , а для композитных сверхпроводников  $t_j > t_h$ . Для жестких сверхпроводников значение  $t_j$  определялось в большом числе экспериментов. В зависимости от свойств образцов и внешних условий измеренные времена очень малы и лежат в диапазоне  $10^{-4} \div 10^{-6}$  с. Полное же время скачка магнитного потока в значительной мере зависит от различных нелинейных эффектов, в частности от нелинейной части вольт-амперной характеристики (ВАХ) сверхпроводника, и может существенно отличаться от  $t_j$  в большую сторону. Критерий терромагнитной устойчивости жестких сверхпроводников в адиабатических условиях, носящий название „адиабатического“ критерия устойчивости, был впервые получен в работе [2]. Он определяет максимальное значение перепада индукции магнитного поля в поперечном сечении сверхпроводника непосредственно перед началом скачка  $B_j$ :

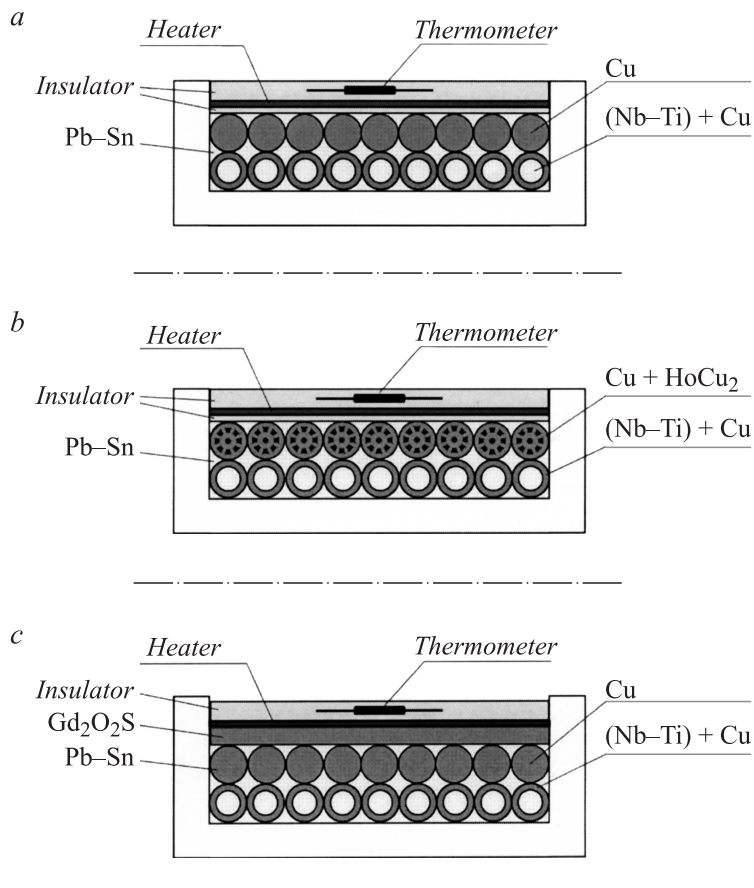
$$B_j = \frac{\pi}{2} \sqrt{\mu_0 C (T_c - T_0)}, \quad (1)$$

здесь  $C$  — объемная теплоемкость сверхпроводника,  $T_c$  — критическая температура сверхпроводника,  $T_0$  — температура сверхпроводника.

Экспериментально измеренные значения  $B_j$  для жестких сверхпроводников лежат в диапазоне 0.1–0.3 Т. В композитных сверхпроводниках  $t_j$  существенно больше, чем в жестких, а значение „адиабатического“ критерия  $B_j$  возрастает в 2 раза — до 0.2–0.6 Т.

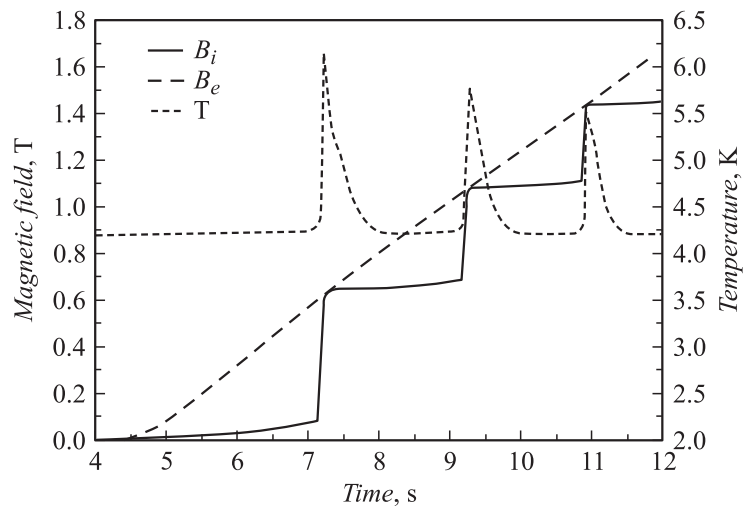
Наши эксперименты заключались в измерении  $B_j$  для трех трубчатых образцов во внешнем, изменяющемся со временем магнитном поле.

Было изготовлено три геометрически подобных образца, представляющих собой пропаянные Pb–Sn припоем двухслойные обмотки.



**Рис. 1.** Поперечные сечения образцов: *a* — контрольный образец без ВД; *b* — образец, легированный HoCu<sub>2</sub>; *c* — образец, легированный Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S.

Внутренний слой всех образцов был намотан из сверхпроводящего одножильного Nb-Ti сверхпроводника в медной оболочке диаметром 0.33 mm (диаметр жилы 0.27 mm). Этот слой моделировал цилиндрический слой сверхпроводника. Второй слой был намотан либо из медного провода  $\varnothing$  0.5 mm у контрольного образца без ВД, либо из медного провода  $\varnothing$  0.48 mm, содержащего 19 тонких жил диаметром

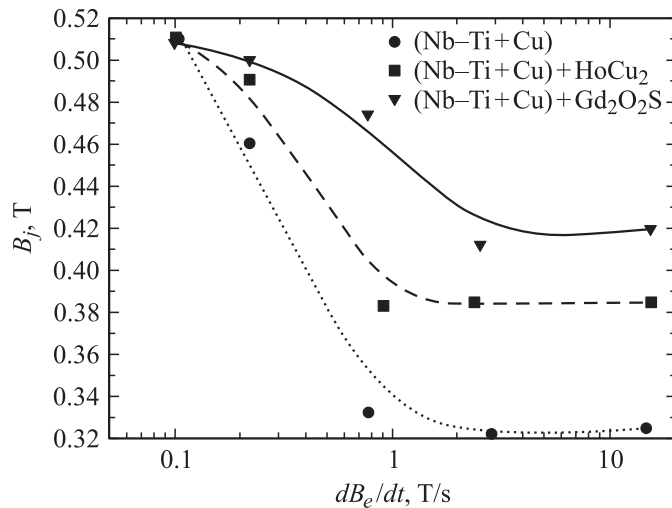


**Рис. 2.** Зависимости магнитного поля в центре образца и его средней температуры от времени.

$60\mu\text{m}$  редкоземельного интерметаллида  $\text{HoCu}_2$ . Третий образец был идентичен контрольному, но на его поверхность наносился слой эпоксидной смолы, смешанной с мелкодисперсным порошком керамики  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  (размер зерна  $\sim 5\mu\text{m}$ ). Все образцы снабжались нагревателем для снятия замороженных магнитных потоков и термометром, показывающим среднюю температуру образца. Поперечные сечения образцов представлены на рис. 1.

В образцах с ВД средняя объемная теплоемкость по сравнению с контрольным возрастала в 5 раз для образца с  $\text{HoCu}_2$  и в 29 раз для образца с  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ . Образцы поочередно помещались в отверстие сверхпроводящего ниобий-титанового соленоида внешнего поля, обеспечивающего скорость изменения поля до  $15\text{T/s}$ . В центре отверстия образца был размещен датчик Холла, фиксирующий скачки магнитного потока.

На рис. 2 показана типичная временная диаграмма следующих величин: магнитного поля внешнего соленоида  $B_e$ , магнитного поля внутри образца  $B_i$  и средней температуры образца. Хорошо видны скачки, когда внешнее магнитное поле очень быстро проникает в центр образца.



**Рис. 3.** Зависимость магнитного поля скачка от скорости изменения внешнего поля.

Затем, спустя некоторое время, образец охлаждается, сверхпроводник возвращается в сверхпроводящее состояние, и процесс экранировки продолжается до следующего скачка. До значения индукции внешнего магнитного поля приблизительно в 2 Т экранирующий ток меньше критического и скачки соответствуют моментам нарушения термомагнитной устойчивости. Небольшой рост магнитного поля в центре образца (0.06 Т) в процессе увеличения внешнего поля обусловлен наличием электрического сопротивления на пути экранирующего тока, когда он замыкается через пропаянную обмотку поперек витков. Оценки дают значение этого сопротивления в  $1.9 \mu\Omega$ .

На рис. 3 зависимость величины первого скачка от скорости изменения внешнего магнитного поля  $\dot{B}_e$  представлена для трех экспериментальных образцов. Поскольку теплоизоляция не обеспечивает полностью адиабатических условий для образца, то, до значений  $\dot{B}_e \sim 3$  Т/с, существует зависимость поля скачка от  $\dot{B}_e$ , характерная для охлаждаемых образцов. Однако при более высоких  $\dot{B}_e$  зависимости выходят на постоянную величину, соответствующую „адиабатическому“ критерию стабильности. Эти величины составили:  $B_j = 0.32$  Т у контрольного

образца без ВД,  $B_j = 0.385$  Т у образца с  $\text{HoCu}_2$  и  $B_j = 0.42$  Т у образца с  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ . Относительная ошибка измерений не превышала 2.5%. Увеличение поля скачка у образцов с ВД соответствует росту эффективной теплоемкости (см. (1)) при развитии терромагнитной неустойчивости в 1.5 раза для образца с  $\text{HoCu}_2$  и в 1.7 раза для образца с  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ . Этот рост существенно меньше, чем внесенная в образцы добавочная теплоемкость, из-за кратковременности скачков магнитного потока.

Результаты экспериментов позволяют положительно ответить на главный вопрос, возможно ли в принципе повысить терромагнитную стабильность сверхпроводников введением в них ВД. Для образца с  $\text{HoCu}_2$  порог устойчивости к скачкам по перепаду магнитного поля в сравнении с контрольным образцом без ВД увеличен на 20%. Аналогичное увеличение для образца с  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  составило 31%. Чтобы добиться большего роста стабильности, необходимо уменьшить времена температурной диффузии в системе „ВД–композитный провод“.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 07-08-00119).

## Список литературы

- [1] *Alekseev P.A., Keilin V.E., Kovalev I.A.* et al. // Superconductor Science and Technology. 2007. V. 20. P. 71–76.
- [2] *Hancox R.* // Phys. Lett. 1965. V. 16. N 3. P. 208–209.