

05:06

## Исследование увеличения стабильности композитного NbTi сверхпроводника с добавкой высокотеплоемкого соединения Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S

© В.Е. Кейлин,<sup>1</sup> И.А. Ковалев,<sup>1</sup> С.Л. Круглов,<sup>1</sup> А.К. Шиков,<sup>1</sup> Д.И. Шутова,<sup>1</sup> А.Е. Воробьева,<sup>2</sup>  
М.И. Медведев,<sup>2</sup> Л.В. Потанина,<sup>2</sup> Н.И. Салуни<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский научный центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия

<sup>2</sup> ВНИИНМ им. А.А. Бочвара,  
123060 Москва, Россия  
e-mail: kev@issph.kiae.ru

(Поступила в Редакцию 9 февраля 2010 г.)

Экспериментально и расчетно исследовано влияние внутреннего легирования высокотеплоемкой добавкой (керамика Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S) NbTi композитного провода, аналогичного по конструкции проводникам для Международного экспериментального термоядерного реактора (ITER), на критические токи и устойчивость к коротким тепловым возмущениям (с характерным временем  $\sim 1$  ms). Введение в провод добавки в количестве 5 vol.% повысило его теплоемкость при 4.2 К в 9 раз. Обнаружено увеличение критического тока провода (NbTi + Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S) по сравнению с контрольным (NbTi) на 8–11% в зависимости от индукции внешнего магнитного поля 5–7 Т. Несмотря на неполную реализацию повышенной теплоемкости, тепловые критические энергии легированных проводов в области токов, близких к критическим, оказались в 3–4 раза выше, чем у нелегированных.

### Введение

Последовательно пройдя стадии различных способов внесения высокотеплоемких добавок (ВД) в состав сверхпроводящих магнитов — от внешнего легирования [1–5] через промежуточное [6–7], — авторы пришли к внутреннему легированию [8–10], т.е. непосредственному введению ВД в состав провода. Этот метод позволяет диссипировать различные тепловые возмущения в сверхпроводящих обмотках механического (время 0.1–1 ms) и магнитного (время 0.01–0.1 ms) [11] происхождения без переходов в нормальное состояние. Поиск новых методов легирования был вызван необходимостью увеличения температуропроводности от сверхпроводника к ВД с сокращением теплового времени полного прогрева ВД: от  $\sim 10$  ms в методике внешнего легирования до  $\sim 1$  ms — при промежуточном и, наконец, до десятков микросекунд при внутреннем легировании.

В последнее время нами был разработан метод непосредственного внесения ВД в состав обычного композитного сверхпроводника [8]. Были изготовлены первые экспериментальные образцы таких сверхпроводников на основе NbTi и Nb<sub>3</sub>Sn длиной 120 м [9]. На ниобий-оловянных проводниках, содержащих добавку PtB<sub>6</sub> в виде тонкого (35  $\mu$ m) кольцевого слоя во внешней медной оболочке провода, благодаря малому времени прогрева жил ВД ( $\sim 20$   $\mu$ s), удалось не только достичь максимальной теплопоглощающей способности образцов (что соответствовало увеличению стабильности к тепловым возмущениям с характерным временем 1.1 ms до четырех раз в зависимости от транспортного тока), но и превысить ее в 1.5 раза за счет дополнительного теплового сопротивления в слое ВД [10].

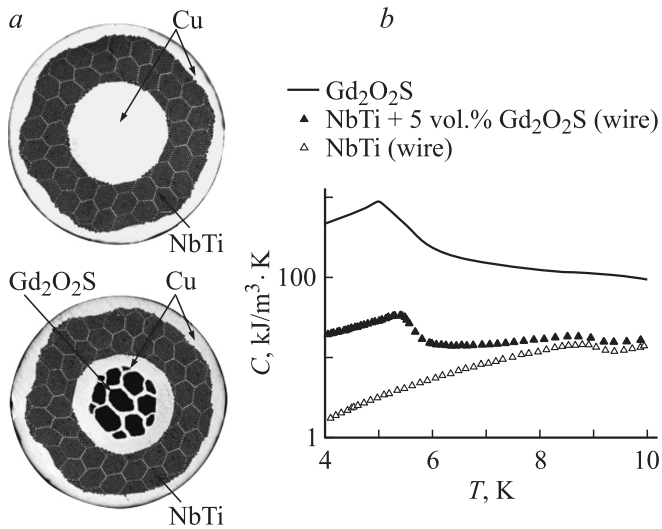
В настоящей статье представлены результаты сравнительного исследования критических токов и устойчивости к тепловым возмущениям NbTi сверхпроводника (близкого по конструкции к проводнику для полоидальных обмоток ITER) с ВД (5% керамики Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S), расположенной в центре сечения, в сравнении с контрольным проводом без добавок.

### Образцы и эксперимент

Добавка Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S вводилась в провод ( $\varnothing 0.73$  mm, число сверхпроводящих волокон — 4242, коэффициент заполнения по NbTi — 42%) в виде 13 жил толщиной 10–70  $\mu$ m, сосредоточенных в центре образца в медной матрице (объемная доля ВД — 5%). Также был изготовлен контрольный провод, идентичный легированному, но без добавок. Поперечные сечения, а также измеренные температурные зависимости теплоемкости изготовленных проводов представлены на рис. 1. Теплоемкость провода (NbTi + Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S) при 4.2 К увеличилась по сравнению с контрольным образцом в 9 раз.

На рис. 2 приведены результаты измерений критических токов проводов (критерий 1  $\mu$ V/cm) в полях до 7 Т. Видно, что критический ток образца (NbTi + Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S) выше на 8–11%, чем у контрольного провода без добавок. Пока этот экспериментальный факт не находит разумного объяснения. Степень воспроизводимости эффекта также пока неясна.

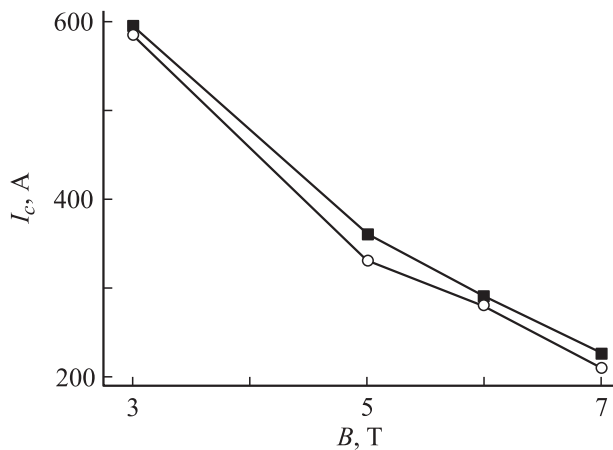
Для проведения экспериментов отрезки проводов длиной 180 mm вклеивались внутрь полых цилиндрических оправок из изолирующего материала (внешний диаметр 7 mm, внутренний — 3 mm). Оправки были сделаны из половинок обычных деревянных карандашей.



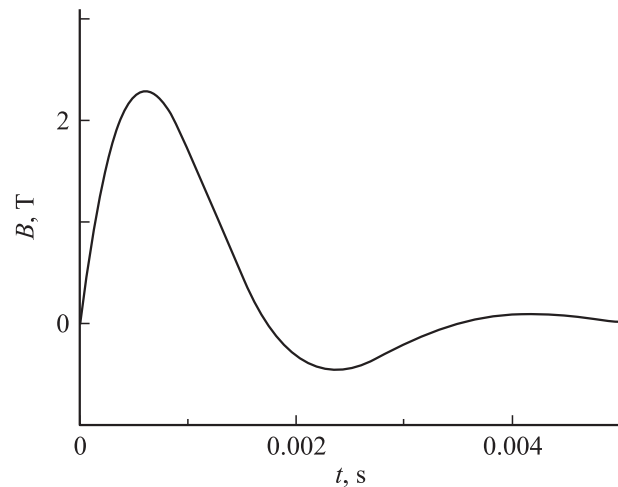
**Рис. 1.** Поперечные сечения (a) и температурные зависимости теплоемкостей (b) изготовленных NbTi проводов с ВД и без нее.

ром 0.125 mm, содержащая 809 витков (длина катушки 120 mm, плотность намотки  $n = 6742 \text{ m}^{-1}$ ). При разряде конденсатора на возмущающую катушку находящийся в постоянном поперечном поле (3 Т) образец подвергался воздействию продольного электромагнитного импульса с частотой  $\nu = 287 \text{ Hz}$  (рис. 3, b). Пример временной развертки индукции возмущающего магнитного поля при напряжении на конденсаторе в 195 V приведен на рис. 4.

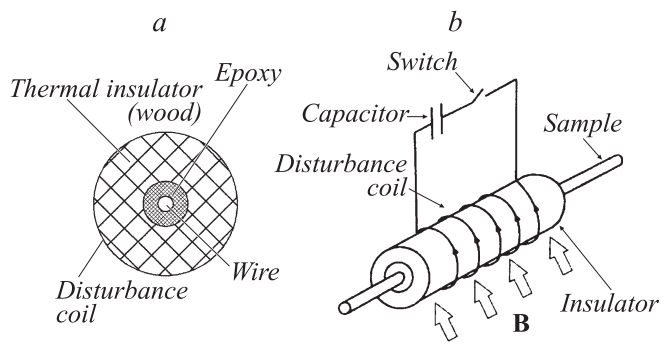
При определенном значении транспортного тока в испытуемом образце методом проб и ошибок определялась минимальная энергия, запасенная в колебательном контуре, при которой возмущение приводило к переходу сверхпроводника в нормальное состояние. На рис. 5 показаны экспериментальные результаты. Видно, что значения критической энергии возмущений, запасенной в конденсаторе, у легированного образца увеличились до двух раз по сравнению с контрольным в зависимости от транспортного тока.



**Рис. 2.** Зависимости критического тока NbTi проводов с ВД (■) и без нее (○) от индукции внешнего магнитного поля.

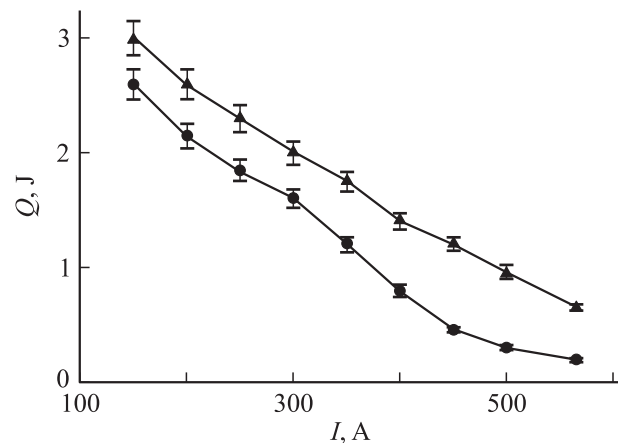


**Рис. 4.** Импульс возмущающего магнитного поля.



**Рис. 3.** Опытный образец (a) и схема эксперимента (b).

Внутренняя полость полностью заполнялась эпоксидным клеем для приближения к адиабатическим условиям (рис. 3, a). На оправки наматывалась возмущающая катушка из тонкого медного провода диамет-



**Рис. 5.** Экспериментальная зависимость критической энергии возмущающего контура от транспортного тока в NbTi образцах с ВД (▲) и без нее (●) во внешнем магнитном поле  $B = 3 \text{ T}$ .

## Расчеты и обсуждение

Поскольку значения критической энергии испытуемых проводов всегда меньше, чем энергии конденсатора (хотя и пропорциональны последним), представляет интерес вычисление по экспериментальным данным плотностей критических энергий образцов и их сопоставление с максимально возможными значениями, соответствующими полному использованию теплоемкости.

Теплопоглощающую способность образца можно записать как

$$H = \int_{T_0}^{T_c(I,B)} C(T) dT \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}, \quad (1)$$

а плотность энергии, выделившейся в нем за время возмущения от электрических потерь, в виде [12]:

$$E = \frac{R_0^4 - r_0^4}{8\rho R_0^2} \int_0^\infty \dot{B}^2(t) dt \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}. \quad (2)$$

Здесь  $C(T)$  — усредненная объемная теплоемкость провода,  $T_0$  — температура жидкого гелия;  $T_c(I, B)$  — критическая температура сверхпроводника, зависящая от индукции магнитного поля и транспортного тока;  $\rho = \rho_{Cu}[(1 + \lambda)/(1 - \lambda)]$  — эффективное поперечное удельное сопротивление матрицы [13];  $\lambda$  — коэффициент заполнения провода сверхпроводником;  $\dot{B}(t)$  — скорость изменения внешнего магнитного поля;  $R_0$  — наружный радиус провода;  $r_0$  — либо радиус области, заполненной жилами ВД (для легированного провода), либо равен нулю для провода без добавок.

Выражение (2), представляющее собой потери энергии в цилиндрической проводящей оболочке под действием внешнего осциллирующего магнитного поля, было получено для случая, когда характерное время затухания вихревых экранирующих токов в оболочке  $\theta$  существенно меньше времени изменения внешнего магнитного поля  $\tau$ . В нашем случае это требование хорошо выполняется:  $\theta = R_0\mu_0(R_0 - r_0)/2\rho \sim 0.1 \text{ ms} < \tau = 1.1 \text{ ms}$ .

Из-за неидеальности адиабатических условий эксперимента учитывался также поток тепла в хладагент через слой тепловой изоляции. Эту часть энергии можно оценить как тепло, необходимое для нагрева до критической температуры слоя эпоксидной смолы  $\Delta$ , захваченного температурной диффузией за характерное время возмущения:

$$\Delta = (\tau\lambda_e/C_e)^{1/2} \text{ [m]}. \quad (3)$$

Здесь  $\lambda_e$  и  $C_e$  — теплопроводность и теплоемкость эпоксидной смолы соответственно. Поскольку тепловые параметры в (3) сильно зависят от температуры в интервале 4–8 К, тепло, поглощенное эпоксидной смолой и отнесенное к объему образца, можно записать в виде

$$Q_e = \frac{2}{R_0} \int_{T_0}^{T_c(I,B)} (\tau\lambda_e(T)C_e(T))^{1/2} dT \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}. \quad (4)$$

Тогда уравнение теплового баланса для образца приобретает вид

$$E = H + Q_e. \quad (5)$$

В зависимости от  $T_c(I, B)$  отношение  $(Q_e/H)100\%$  лежит в диапазоне 2–20%.

На рис. 6 приведено сравнение вычисленных таким образом экспериментальных критических энергий проводов с их максимальной теплопоглощающей способностью.

На рис. 7 приведены расчетные и экспериментальные отношения критической энергии проводов с ВД к энергии проводов без добавок или, другими словами, коэффициенты увеличения криостатической стабильности легированных проводников.

Из рисунков видно, что в ходе эксперимента не удалось достичь расчетного увеличения стабильности легированных проводов из-за неполного исполь-

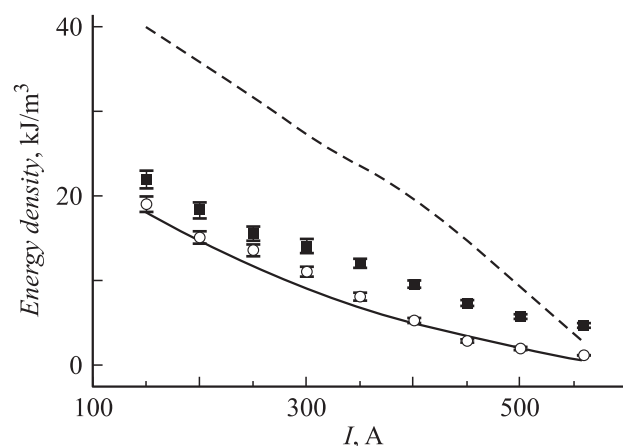


Рис. 6. Сравнение экспериментальных критических энергий NbTi проводов с ВД (■) и без нее (○) с их максимальной теплопоглощающей способностью легированного (пунктир) и контрольного (сплошная кривая) образцов.

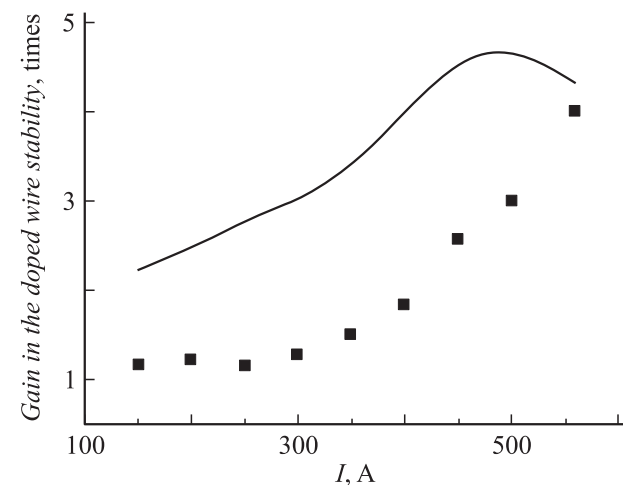


Рис. 7. Расчетные (кривая) и экспериментальные (точки) токовые зависимости коэффициента увеличения криостатической стабильности образца с ВД по отношению к нелегированному.

зования повышенной теплоемкости добавки (хотя характерное время прогрева жил  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$   $\tau_{\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}} \approx d^2 C_{\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}}(T) / \lambda_{\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}}(T) \approx 1.3 \text{ ms}$  сравнимо с продолжительностью возмущения  $1.1 \text{ ms}$ ; такого соотношения времен, по всей видимости, оказалось недостаточно для полного прогрева жил ВД). Однако даже несмотря на неполное „срабатывание“ теплоемкости, легированные NbTi проводники при токах, близких к критическим, оказались до 4 раз более стабильными к тепловым возмущениям, чем аналогичные провода без добавок. Главный вывод из полученных результатов заключается в следующем: большое процентное содержание ВД в проводнике само по себе не гарантирует 100% реализации повышенной теплоемкости (а соответственно и расчетного увеличения стабильности провода). Необходимое условие „срабатывания“ теплоемкости: время прогрева добавки должно быть существенно меньше характерного времени возмущения. Применительно к описанным (NbTi +  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ) проводам при более удачной конструкции жил, соответствующей полному использованию теплоемкости, полученного на эксперименте увеличения стабильности можно было бы добиться всего лишь 1.5% легированием ВД, что было бы существенно проще (и соответственно дешевле) с точки зрения технологии изготовления.

## Заключение

При проведении экспериментов с первыми образцами композитных NbTi сверхпроводников с внутренним легированием ВД  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  (5 vol.%) получены весьма обнадеживающие результаты. Значения критической энергии тепловых возмущений (по длительности и энергиям соответствующих механотермическим возмущениям) в легированном образце при транспортных токах, близких к критическому, оказались до четырех раз выше, чем для контрольного провода без добавок. Обнаруженный эффект увеличения на 8–11% критического тока легированного образца пока не находит разумного объяснения.

Работа частично финансировалась корпорацией ТВЭЛ.

Мы благодарим Г.Х. Панову и А.А. Шикова за измерения температурных зависимостей теплоемкостей экспериментальных проводов и керамики  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ .

## Список литературы

- [1] *Alekseev P.A.* et al. Superconducting windings manufacturing method (variants). Russian Patent. N 2254633. 2003.
- [2] *Alekseev P.A.* et al. // *Cryogenics*. 2004. Vol. 44. N 1. P. 763–766.
- [3] *Alekseev P.A.* et al. // *Cryogenics*. 2006. Vol. 46. P. 252–255.
- [4] *Keilin V.E.* et al. // *Tech. Phys.* 2008. Vol. 53. N 11. P. 1522–1524.
- [5] *Keilin V.E.* et al. // *Supercond. Sci. Tech.* 2008. Vol. 21. P. 025 018.
- [6] *Akimov I.I.* et al. Composite superconductor. Russian Patent. N 2273906. 2006.
- [7] *Alekseev P.A.* et al. // *Supercond. Sci. Techn.* 2007. Vol. 20. P. 71–76.
- [8] *Alekseev P.A.* Thermostabilized superconductor. Russian Patent. N 2334296. 2008.
- [9] *Potanina L.V.* et al. // *ICMC*. 2008. Vol. 54. P. 349–356.
- [10] *Keilin V.E.* et al. // *Supercond. Sci. Techn.* 2009. Vol. 22. P. 085 007.
- [11] *Iwasa Y.* // *IEEE Trans Appl. Supercond.* 2005. Vol. 15. P. 1615–1621.
- [12] *Trokhachev G.V.* Preprint P-B-0426 of Efremov Institute. 1979. P. 9–10.
- [13] *Carr W.I.* *IEEE Trans Magn.* 1977. Vol. 13. N 1. P. 192.