

05;12

Влияние легирования сверхпроводящих соленоидов высокотеплоемкими добавками на стабильность в динамических режимах

© В.Е. Кейлин, И.А. Ковалев, С.Л. Круглов, Д.И. Шутова

Российский научный центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: kev@isssph.kiae.ru

(Поступило в Редакцию 8 июля 2009 г.)

Исследована скоростная зависимость тока перехода в нормальное состояние четырех небольших NbTi соленоидов, отличающихся наличием или отсутствием высокотеплоемкой добавки (ВД) из керамики Gd_2O_2S в виде мелкодисперсного порошка (4.9% по объему обмотки, что увеличивает ее среднюю теплоемкость при 4.2 К в 10 раз), а также количеством волокон NbTi в проводнике диаметром 0.85 мм (2970 и 8910). ВД вносилась в обмотку в смеси с эпоксидной смолой („мокрый“ процесс намотки). При скорости изменения собственного магнитного поля ≥ 5 Т/с в центральных витках соленоида без ВД из проводника с 2970 волокнами происходили его преждевременные переходы в нормальное состояние, обусловленные, по всей вероятности, возникновением скачков магнитного потока. В соленоиде этого же проводника, но с ВД, переходы происходили при токах в 2–3 раза более высоких из-за нагрева до критической температуры от электрических потерь (подтверждено расчетами). Таким образом, продемонстрировано не только повышение устойчивости соленоидов с ВД к продолжительным (0.1–1 с) тепловыделениям, но и к гораздо более кратковременным (10–100 μ s) скачкам магнитного потока.

Введение

В нашей предыдущей работе по этой тематике [1] исследовалось влияние легирования высокотеплоемкой добавкой (ВД) овальных обмоток из резерфордского кабеля на их токи перехода в нормальное состояние при больших значениях скорости ввода тока ~ 4 кА/с ($dB/dt \sim 6.5$ Т/с). Использование в качестве ВД (3% по объему обмотки) редкоземельных интерметаллидов $CeCu_6$ и $HoCu_2$ (теплоемкость которых при 4.2 К в 50 и в 300 раз соответственно больше теплоемкости меди) привело к увеличению токов перехода на 12–35%. Однако поскольку эти ВД являются проводниками, что снижает электрическую прочность обмоток, в последнее время в качестве ВД нами стала использоваться керамика Gd_2O_2S с теплоемкостью в 600 раз большей, чем у меди при 4.2 К.

В настоящей работе исследовано влияние скоростей ввода тока/поля на токи перехода в нормальное состояние для небольших сверхпроводящих соленоидов с ВД и без нее, намотанных из многоволоконных NbTi проводов с различным количеством волокон (2970 и 8910).

Экспериментальные соленоиды

Для экспериментов из многоволоконного NbTi провода диаметром 0.85 мм были намотаны 4 небольших сверхпроводящих соленоида одинаковой геометрии, содержащих 743–745 витков, с внутренним диаметром 23 мм, внешним — 48 мм, высотой 50 мм, индуктивностью 7.5 мН и отношением максимального поля к току 15.8 мТ/А. Соленоиды были изготовлены с

использованием „мокрого“ процесса намотки с промазыванием слоев эпоксидной смолой для заполнения межвиткового пространства. Различие состояло только в наполнителях в эпоксидную смолу, обычно используемых для увеличения теплопроводности обмоток и предотвращения растрескивания. В контрольных соленоидах без ВД использовался стандартный наполнитель BN (нитрид бора) в виде мелкого порошка (средний размер зерна ~ 50 μ m). В качестве наполнителя в соленоидах с ВД использовался порошок керамики Gd_2O_2S (средний размер зерна ~ 8 μ m). Объемное содержание ВД в соленоидах составило 4.9%, что при 4.2 К соответствует приблизительно десятикратному увеличению средней теплоемкости обмотки. Соленоиды незначительно различались критическими токами: 409 А ($B_{max} = 6.46$ Т) для соленоидов из проводника с 2970 волокнами и 420 А ($B_{max} = 6.64$ Т) в случае 8910 волокон.

Эксперимент

Для всех изготовленных соленоидов экспериментально исследовалась зависимость тока перехода в нормальное состояние от скорости ввода тока, представленная на рис. 1.

Обнаружено аномальное поведение зависимости для соленоида BN-2970 (для удобства введено обозначение соленоидов по наполнителю и числу волокон в проводнике) при скорости ≥ 300 А/с по сравнению с другими соленоидами. Резкое уменьшение достигнутых токов перехода, по всей видимости, можно объяснить возникновением скачков магнитного потока в центральных витках первого слоя, где собственное магнитное

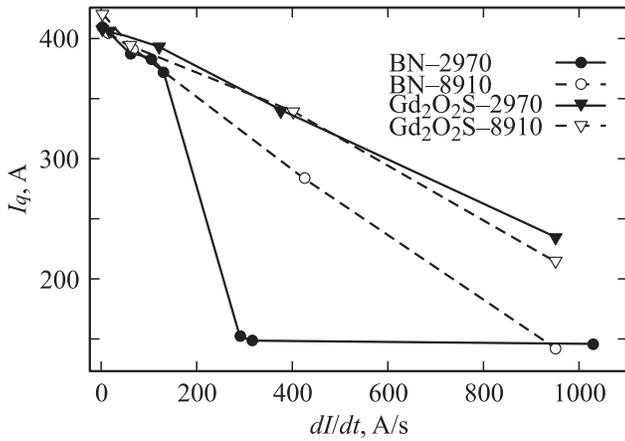


Рис. 1. Экспериментальные зависимости токов перехода соленоидов в нормальное состояние от скорости ввода тока.

поле и скорость его изменения максимальны. Скачки магнитного потока — это очень быстрые (10–100 μ s) переходы от крайне неоднородного распределения тока по сечению провода к однородному, с выделением тепла, достаточного для нагрева провода до температуры выше критической [2]. Характерно, что соленоид BN-8910 с практически такой же, что и у соленоида BN-2970, ВАХ (у обоих при 6 Т параметр нарастания $n = 30\text{--}35$) и с отличающимся всего на 3% критическим током, ведет себя в исследуемой области скоростей ввода поля принципиально по-другому (см. рис. 1). Его токи перехода в несколько раз выше, чем для соленоида BN-2970, и обусловлены, по всей вероятности, нагревом проводника за счет электрических потерь. Чтобы проверить предположение о скачках потока в проводнике соленоида BN-2970, при скорости ввода тока ≥ 300 А/с, был проведен расчет скоростной зависимости тока перехода в нормальное состояние, вызванного нагревом от электрических потерь.

Расчеты и обсуждение

Полные электрические потери в единице объема скрученного многоволоконного сверхпроводника (\dot{Q} [W/m³]) можно представить как сумму вихревых потерь в медной матрице (первое слагаемое в (1)) и гистерезисных потерь в сверхпроводящих волокнах (второе слагаемое в (1)) [3]:

$$\dot{Q} = \frac{2(\dot{B})^2}{\mu_0} \tau + \frac{8}{3\pi^2} \frac{d_j}{D^2} I_c(B) \dot{B}, \quad (1)$$

где \dot{B} — скорость изменения собственного магнитного поля; $\tau = \mu_0 L_p^2 / 8\pi^2 \rho_t$ — электродинамическая постоянная времени скрученного провода, L_p — шаг скрутки; $\rho_t = \rho_n [(1 + \lambda)/(1 - \lambda)]$ — эффективное поперечное сопротивление матрицы [4], λ — коэффициент заполнения провода сверхпроводником; ρ_n — удельное сопротивление меди при гелиевой температуре; d_j и D — диаметр

сверхпроводящего волокна и провода соответственно; $I_c(B)$ — зависимость критического тока сверхпроводника от магнитного поля.

В момент перехода в нормальное состояние температура центрального витка первого слоя соленоида (наиболее слабого с точки зрения максимума электрических потерь) достигает критической температуры сверхпроводника, зависимость которой от транспортного тока и поля определяется известным выражением [5]:

$$T_c(I, B) = T_c(B) - (T_c(B) - T_0) \left(\frac{I}{I_c(B)} \right). \quad (2)$$

Эту температуру также можно найти как решение уравнения теплопроводности (3) с соответствующими начальным условием (4) и граничными условиями (5)–(6):

$$T_t(r, t) = a^2 \Delta T(r, t) + \frac{\bar{Q}}{C\gamma}, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad (3)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dr} \Big|_{r=R_1} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dT}{dr} + \frac{\alpha}{k} (T - T_0) \Big|_{r=R_2} = 0, \quad (6)$$

где R_1, R_2 — внутренний и внешний радиусы обмотки; соответственно $a^2 = k/C\gamma$ — коэффициент температуропроводности, k, C, γ — усредненные теплопроводность, теплоемкость и плотность обмотки соответственно, T_0 — температура жидкого гелия; $\alpha = 60.8 q^{0.619}$ [W/m²K] — коэффициент теплопередачи с поверхности обмотки в жидкий гелий [6], \bar{Q} — усредненная по r мощность тепловыделения в единице объема обмотки, определяемая выражением (1), $q = \bar{Q}(R_2^2 - R_1^2)/2R_2$ — тепловой поток с поверхности соленоида в хладагент, $T_c(B) = T_{c0} \sqrt{1 - B/B_{c0}}$; для NbTi $B_{c0} = 15$ Т и $T_{c0} = 9.3$ К.

На рис. 2 сравниваются экспериментальные и расчетные зависимости тока перехода в нормальное состояние от скорости изменения максимального магнитного поля. Расчетные зависимости для соленоидов с одинаковыми наполнителями, но с различным количеством волокон в проводнике, отличаются незначительно (что также подтверждается близостью экспериментальных кривых для соленоидов Gd₂O₂S-8910 и Gd₂O₂S-2970), поэтому для наглядности на рис. 2 приведены расчеты только для двух соленоидов: BN-2970 и Gd₂O₂S-8910. Видно удовлетворительное совпадение эксперимента и расчета, кроме точек, соответствующих переходам соленоида BN-2970 при больших значениях dB/dt . Все переходы в нормальное состояние соленоида BN-2970 при $dB/dt \sim 5$ Т/с не могут быть объяснены их нагревом от электрических потерь, и возникновение скачков потока остается единственной причиной преждевременных переходов. Переход в нормальное состояние соленоида BN-8910 при $dB/dt = 14.8$ Т/с и при токе значительно ниже

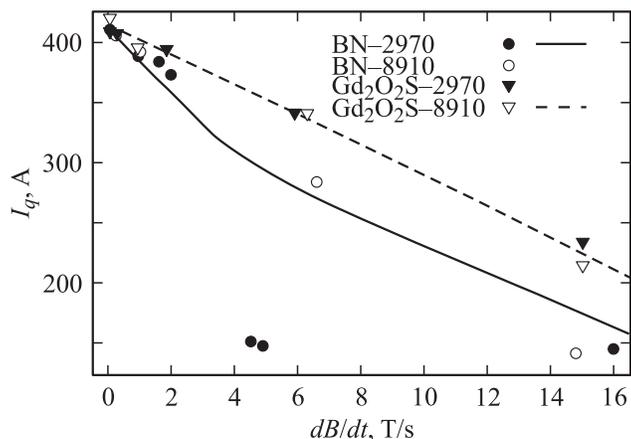


Рис. 2. Сравнение расчетных (линии) и экспериментальных зависимостей (точки) токов перехода соленоидов в нормальное состояние от скорости изменения собственного магнитного поля.

расчетного также вызван скачком магнитного потока. В соленоидах с ВД таких скачков не происходит, вплоть до 15 Т/с. Этот факт согласуется с результатом нашей экспериментальной работы по исследованию влияния ВД (Gd_2O_2S) на устойчивость $NbTi$ сверхпроводников к скачкам магнитного потока [7]. Для одноволоконного $NbTi$ провода в медной оболочке диаметром 0,33 мм (диаметр $NbTi$ волокна — 0,27 мм) использование ВД позволило повысить критерий „адиабатической“ устойчивости (допустимый перепад магнитного поля в поперечном сечении проводника, гарантирующий от возникновения скачков магнитного потока) на 31%.

Сравнение зависимостей для соленоидов $Gd_2O_2S-8910$ и $BN-8910$ показывает, что введение ВД в обмотку существенно поднимает токи перехода (на 25–55% при скорости ввода поля 5–16 Т/с) и полностью исключает появление скачков магнитного потока в проводнике (поднимает уровень термомагнитной стабильности).

Заключение

Использование метода внешнего легирования малым количеством (несколькими объемными процентами) ВД сверхпроводящих соленоидов позволило добиться не только увеличения токов их перехода в нормальное состояние в быстропеременных режимах (на 25–55% при скорости изменения магнитного поля до 16 Т/с), но и подавления термомагнитных неустойчивостей типа скачков магнитного потока в проводнике.

Благодаря своей простоте этот метод может иметь широкое практическое применение, например для магнитов ускорителей и индуктивных накопителей энергии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке корпорации ТВЭЛ. Также благодарим В.И. Щербакова за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Alekseev P.A., Boev A.I., Keilin V.E.* et al. // *Cryogenics*. 2006. Vol. 46. P. 252–255.
- [2] *Iwasa Y.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2005. Vol. 15. P. 1615–1621.
- [3] *Уилсон М.* Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985. С. 210–216.
- [4] *Carr W.I.* // *IEEE Trans. Magnetics*. 1977. Vol. MAG-13 (1). P. 192.
- [5] *Keilin V.E.* // *Proc. of the Soviet Academy of Sci.* 1982. Vol. 263. N 1. P. 90–92.
- [6] *Кириченко Ю.А., Русанов К.В.* Теплообмен в гелии-I в условиях свободного движения. Киев: Наук. думка, 1983. С. 27–35.
- [7] *Keilin V.E., Kovalev I.A., Kruglov S.L.* et al. // *Tech. Phys. Lett.* 2008. Vol. 34. N 5. P. 418–420.