

05;12

Исследование влияния добавок веществ с экстремально высокой теплоемкостью на тренировку сверхпроводящих обмоток

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

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

(Поступило в Редакцию 4 февраля 2008 г.)

Описаны опыты по тренировке тонких соленоидов с добавками веществ, обладающих экстремально высокой теплоемкостью при низких температурах (высокотеплоемкими добавками — ВД), и — для сравнения — без ВД во внешнем магнитном поле. В качестве ВД была использована керамика Gd_2O_2S (6.4% от объема обмотки, что увеличило теплоемкость последней в 12.5 раза). В соленоиде с ВД по сравнению с аналогичным без нее ток начала тренировки увеличился на 35%, а достигнутый за 20 вводов ток перехода — на 18%. При этом напряжение растяжения составило $\sigma = 300$ МПа (в модели свободного витка).

PACS: 84.71.Mn

Введение

В сверхпроводящих обмотках существует целый ряд возмущений механического происхождения, которые могут привести к их преждевременному переходу в нормальное состояние. Продолжительность этих локальных импульсных возмущений, как правило, порядка миллисекунд, а плотность выделившейся энергии — порядка 10 kJ/m^3 и выше [1–4], его часто вполне достаточно для появления нормальной зоны в проводнике и начала перехода обмотки в нормальное состояние. В предыдущих наших работах [5,6] было продемонстрировано значительное повышение устойчивости к тепловым возмущениям сверхпроводящих обмоток, легированных некоторыми ВД-интерметаллидами редкоземельных металлов $CeCu_6$ и $HoCu_2$, обладающими экстремально высокой удельной теплоемкостью при низких температурах. ВД вводились в состав обмотки в количестве от 3 до 6% от ее объема в виде порошков с размером зерна $50\text{--}70 \mu\text{m}$, смешанных с эпоксидной смолой, в процессе „мокрой“ намотки — т.е. послойной промазки каждого слоя витков. В качестве испытуемых обмоток использовались либо небольшие соленоиды Nb–Ti ($\sim 6\%$ ВД по объему) [15], либо овалы обмотки, намотанные резерфордовским кабелем ($\sim 3\%$ ВД по объему) [6].

В экспериментах соленоиды подвергались внешним электромагнитным возмущениям длительностью 8 ms при различных транспортных токах. Увеличение критической энергии легированных обмоток по сравнению с нелегированными составляло несколько раз. На овалы обмотки была продемонстрирована возможность получения более высоких скоростей изменения магнитного поля. Было замечено также некоторое улучшение процесса тренировки легированных овалы обмоток, но внимание на этом в [6] не акцентировалось. Наличие ВД ($CeCu_6$ и $HoCu_2$) несколько увеличило токи начала тренировки овалы обмоток (на 30%), но не повлияло

на токи ее окончания. Высокий уровень растягивающих (> 300 МПа) и изгибающих механических напряжений в овалы обмотках приводил к высокой степени деградации достигнутых токов.

В последнее время стали использовать керамику Gd_2O_2S из-за ее большей мелкодисперсности ($\sim 8 \mu\text{m}$), отсутствия пирофорности и более высокой теплоемкости. Например, при $T = 5$ К теплоемкость Gd_2O_2S в 3 раза больше, чем у $HoCu_2$, и в 600 раз больше, чем у меди. Поэтому было решено исследовать влияние этой ВД на тренировку специально подготовленной сильно механически нагруженной обмотки ($\sigma < 200$ МПа).

Эксперименты с цилиндрическими обмотками

Были изготовлены и испытаны два четырехслойных соленоида одинаковой геометрии из Nb–Ti-провода в лаковой изоляции. Диаметр провода без изоляции — 0.85 mm , отношение $Cu/Sc = 1.27$; число Nb–Ti-волокон — 2970; диаметр волокон — $10 \mu\text{m}$; критические токи при температуре 4.2 К в поле 5, 6 и 7 Т составляют 662, 488 и 320 А соответственно. Обмотки были изготовлены с использованием „мокрого“ процесса намотки с промазыванием эпоксидной смолой. В одной из обмоток в эпоксидную смолу был добавлен мелкодисперсный порошок керамики Gd_2O_2S со средним размером зерна $8 \mu\text{m}$. Объемное содержание ВД в обмотке составило 6.4%, что повысило ее среднюю теплоемкость в 12.5 раза.

Оба соленоиды были размещены внутри соленоида, создававшего в испытуемых обмотках внешнее поле индукцией от 1.8 до 1.9 Т. Схема взаимного расположения соленоида внешнего поля и испытуемых соленоидов, а также их размеры приведены на рис. 1. Параметры соленоидов: количество витков — 458; длина провода —

350 мТ; коэффициент в центре на оси — 2.15 мТ/А; коэффициент в центре на обмотке 3.69 мТ/А; индуктивность 68.7 мНп. Из приведенных цифр ясно, что индукция, создаваемая соленоидом внешнего поля, в несколько раз больше максимальной индукции, создаваемой испытываемыми соленоидами (например, при токе в последних 250 А их максимальная индукция составляет около 0.9 Т). Поэтому реальные механические напряжения в витках испытываемых соленоидов в значительной степени определяются произведением их транспортного тока на индукцию соленоида внешнего поля и близки к вычисленным по модели свободного витка.

Еще одной отличительной особенностью схемы эксперимента является воздействие на испытываемые соленоиды больших осевых сил, обусловленных их несимметричным расположением относительно соленоида внешнего поля. Это обстоятельство, безусловно, приводит к появлению дополнительных механических возмущений. Таким образом, силовая ситуация, в которой находятся испытываемые соленоиды, должна неминуемо привести к их ярко выраженной тренировке.

Эксперименты заключались в серии из 20 последовательных переводов каждой из обмоток в нормальное состояние транспортным током во внешнем поле

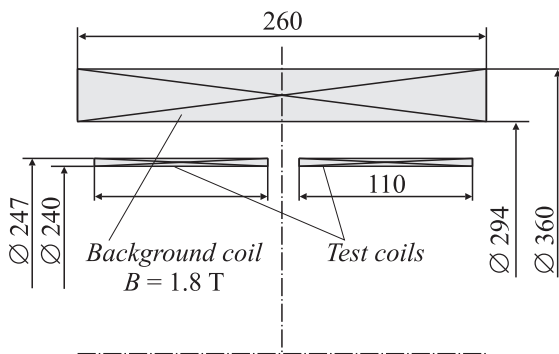


Рис. 1. Схема эксперимента по тренировке соленоидов (размеры в мм).

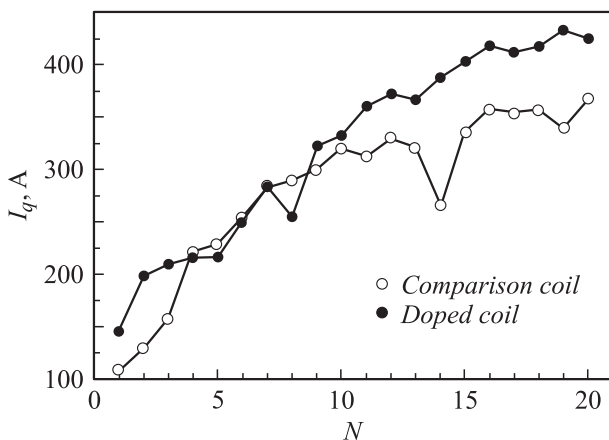


Рис. 2. Зависимость тока перехода обмоток в нормальное состояние от номера ввода тока.

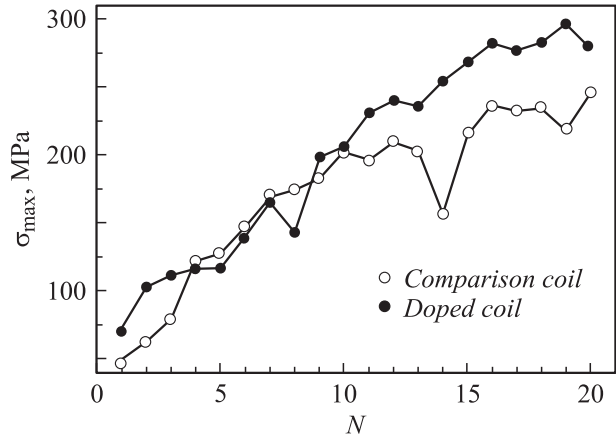


Рис. 3. Зависимость максимального механического напряжения в витках обмоток до перехода в нормальное состояние от номера ввода тока.

1.8 Т. Направление транспортного тока соответствовало суммированию внешнего и собственного полей. Скорость ввода тока составляла 3.5 А/с. Большой уровень пондеромоторных нагрузок гарантировал естественную генерацию тепловых возмущений механического происхождения.

По граничным значениям тока в процессе тренировки соленоидов можно судить о способности обмоток к диссипации тепловых возмущений механического происхождения. На рис. 2 представлена зависимость тока перехода испытываемых обмоток от номера ввода тока (тренировка).

На рис. 3 представлена зависимость максимального механического напряжения в модели свободного витка в витках обмоток от номера ввода тока. Видно, что по сравнению с обычной обмоткой ток начала тренировки у обмотки с ВД выше на 35% (механическое напряжение — на 40%), а достигнутый ток за 20 вводов выше на 18% (механическое напряжение — на 21%). Это позволяет сделать вывод о большей устойчивости обмотки с ВД к возмущениям механического происхождения. Заслуживает внимания факт достижения обмоткой с ВД механических напряжений почти в 300 МПа, что существенно выше характерных механических напряжений в безбандажных сверхпроводящих магнитах (обычно порядка 100–150 МПа). Как уже обсуждалось выше, в данном случае напряжения в модели свободного витка весьма близки к реальным, так как в значительной степени они создаются благодаря наличию внешнего поля.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов безусловно свидетельствуют о положительном влиянии ВД на тренировку и деградацию сильно механически нагруженных обмоток. Увеличение средней теплоемкости овальной

обмотки с ВД HoCu_2 в 4.5 раза (в 3 vol.% ВД) позволило лишь сократить тренировку (ток начала тренировки выше на 30%). В экспериментах с соленоидами, где теплоемкость обмотки с ВД увеличена в 12.5 раза (6.4 vol.% ВД), ток начала тренировки вырос на 35%, а предельно достигнутый ток — на 18% при механическом напряжении 300 МПа.

Очевидно также, что повышенная теплоемкость обмоток, легированных ВД, реализуется далеко не полностью из-за весьма малых характерных времен механических возмущений (согласно [7], не более нескольких миллисекунд) — меньших, чем характерные времена температурной диффузии в легированных обмотках. Последние составляют, по нашим оценкам, по крайней мере, несколько десятков миллисекунд. В связи с этим можно ожидать, что эффективность легирования ВД для преодоления тренировки окажется выше у обмоток больших размеров, в которых из общих соображений следует ожидать увеличения характерных времен механических возмущений.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 07-08 00119.

Список литературы

- [1] *Kensley R., Iwasa Y.* // *Cryogenics*. 1980. Vol. 20. P. 25–35.
- [2] *Anashkin O.P., Keilin V.E., Krivikh A.V.* // *Cryogenics*. 1979. Vol. 19. P. 31.
- [3] *Maeda H., Iwasa Y.* // *Cryogenics*. 1982. Vol. 22. P. 473–476.
- [4] *Janagi H. et al.* // *Cryogenics*. 1989. Vol. 29. P. 753–757.
- [5] *Alekseev P.A. et al.* // *Cryogenics*. 2004. Vol. 44. P. 763–768.
- [6] *Alekseev P.A. et al.* // *Cryogenics*. 2006. Vol. 46. P. 252–256.
- [7] *Iwasa Y.* // *IEEE Trans. of Appl. Superconductivity*. 2005. Vol. 15. P. 1615–1620.