

05.4;12

Скорость поперечного распространения нормальной зоны в сверхпроводящих обмотках, стабилизированных алюминием

© В.В. Лысенко, О.П. Анашкин

Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва

Поступило в Редакцию 16 января 1998 г.

В окончательной редакции 29 января 1999 г.

Представлены результаты измерения скорости поперечного распространения нормальной зоны в сверхпроводящих обмотках из проводника с медно-алюминиевой стабилизирующей матрицей. Измерения проведены на модельных катушках, компаундированных и некомпаяндрованных. Специальная конструкция катушек позволила моделировать одномерное распространение нормальной зоны в обмотке в радиальном направлении.

Принято различать два основных механизма распространения нормальной зоны в сверхпроводящих магнитах погружного типа: вдоль проводника и за счет диффузии тепла через межвитковую изоляцию [1]. Несмотря на то что характерное отношение скоростей нормальной зоны для продольного и поперечного направлений составляет порядка 100, механизм межвиткового распространения играет доминирующую роль в процессе роста нормальной зоны в большинстве практически важных случаев [2].

Данная работа представляет результаты измерения скорости межвиткового движения нормальной зоны в радиальном направлении в модельных обмотках из сверхпроводника со стабилизирующей матрицей из алюминия, плакированного тонким слоем меди [3,4]. Размер проводника составлял 3.5×2 mm, толщина медного покрытия — около $50 \mu\text{m}$. Композитный сверхпроводящий провод на основе сплава ниобий–титан диаметром 0.7 mm был запаян в канавке матрицы. Проводник был изолирован полиимидной пленкой, общая толщина изоляции — 0.12 mm. Измерения были выполнены для двух марок проводника, отличавшихся материалом матрицы: из алюминия технической чистоты марки А5Е и относительно высокой чистоты марки А995. Значения остаточного удельного сопротивления проводников составили соответственно

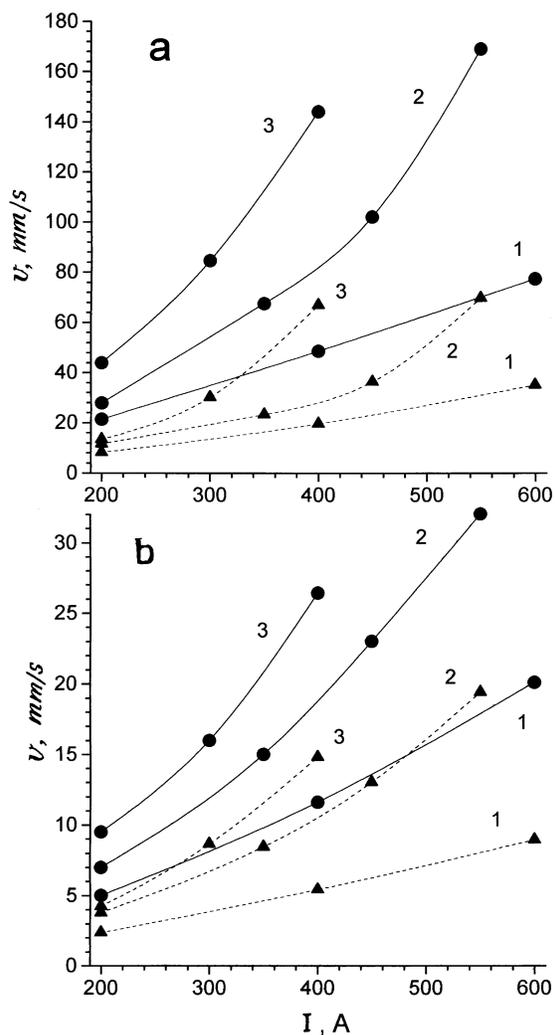
$1.0 \cdot 10^{-9}$ и $1.3 \cdot 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$. Результаты измерения скоростей продольного распространения нормальной зоны в этих проводниках, а также некоторые другие параметры приведены в работе [5].

Эксперименты проводились на небольших модельных катушках специальной конструкции, позволивших моделировать процесс одномерного распространения нормальной зоны в радиальном направлении. Для изучения влияния жидкого гелия, возможно содержащегося в обмотке, эксперименты были проведены как с компаундированными, так и с некомпактированными катушками. Катушки пропитывались эпоксидным компаундом ЭД20 методом "мокрой намотки". В некомпактированной обмотке, учитывая плотную намотку, пустоты занимали по нашим оценкам не более 3% от общего объема.

Катушки наматывались на каркасы из текстолита и имели внутренний диаметр 58 mm, наружный 110 mm, длину 80 mm. Рабочими слоями, к которым подводился ток, являлись слои с 4-го по 10-й, считая от внутреннего диаметра. Три внутренних слоя служили для обеспечения тепловых граничных условий. Каждый слой был намотан отдельным куском провода, концы которого были выведены на торцы каркаса, где припаяны к толстым медным секторам. Последние хорошо охлаждались жидким гелием, что исключало возможность перехода нормальной зоны со слоя на слой за счет распространения вдоль проводника. Слои были соединены между собой так, что направление тока в каждом последующем слое было противоположным предыдущему слою. Таким образом, собственное магнитное поле катушки было невелико. Поверх 10-го слоя обмотки был расположен нагревательный элемент в виде полосы из нержавеющей фольги толщиной 0.1 mm и два слоя банджа. Нагреватель покрывал почти всю наружную поверхность обмотки, чтобы обеспечить практически одновременный переход слоя в нормальное состояние.

При проведении измерений в исследуемую катушку вводился ток заданной величины, с помощью нагревателя инициировалась нормальная зона и регистрировались напряжения на внутренних слоях. Транспортный ток в катушке и внешнее магнитное поле были постоянны во времени.

На рисунке представлены значения скоростей, определенные по времени прохождения нормальной зоны через три внутренних слоя (с восьмого на пятый). Погрешность нахождения скорости составила примерно 10%. Как видно из рисунка, скорости для проводника, стабилизированного алюминием марки А5Е, оказались значительно



Скорость поперечного распространения нормальной зоны в проводнике, стабилизированном алюминием марки А5Е (а) и А995 (б), в зависимости от тока. Величина внешнего магнитного поля: 0 Т (1); 2 Т (2); 4 Т (3). Компаундированная обмотка — кружки; некомпанурированная обмотка — треугольники.

выше (в 3–5 раз) соответствующих значений для проводника с матрицей на основе более чистого алюминия А995.

Измерения показали значительное снижение скорости движения нормальной зоны (в 2–3 раза) в некомпандированных обмотках по сравнению с компандированными. Можно указать два возможных объяснения этого результата: более высокая поперечная теплопроводность изоляции в проклеенной обмотке и влияние жидкого гелия, содержащегося в пустотах некомпандированной обмотки. Столь же сильное различие значений скорости в компандированных и некомпандированных катушках имело место и для продольного распространения нормальной зоны в подобных обмотках [5], что может быть объяснено только влиянием жидкого гелия, но не различием в теплопроводности изоляции. Действительно, вклад изоляции в эффективную продольную теплопроводность обмотки пренебрежимо мал, а влияние поперечной диффузии тепла в этом случае носит противоположный характер, то есть увеличение поперечного теплообмена ведет к снижению скорости продольного распространения нормальной зоны. Как полагают авторы, влияние жидкого гелия, находившегося в межвитковом пространстве некомпандированных катушек, являлось преобладающим фактором уменьшения скорости и в случае поперечного распространения нормальной зоны.

Полученные экспериментальные значения скорости распространения нормальной зоны в сверхпроводниках, стабилизированных алюминием, необходимы при проектировании защиты крупных сверхпроводящих магнитов, изготовленных из проводников такого типа.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта РИЦ "Курчатовский институт" № 32 и Гранта ведущих научных школ РФФИ № 96–15–98230.

Список литературы

- [1] Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985. С. 405.
- [2] Joshi C.H. and Iwasa Y. // *Cryogenics*. 1989. V. 29. P. 157–167.
- [3] Keilin V.E., Anashkin O.P., Krivikh A.V. // *Adv. in Cryog. Eng.* 1992. V. 38. P. 699–702.
- [4] Sytnikov V.E., Rychagov A.V., Ipatov Ju.P. et al. // *Adv. in Cryog. Eng.* 1992. V. 38. P. 703–708.
- [5] Лысенко В.В., Анашкин О.П. // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т. 23. В. 13. С. 52–57.