

05.4;12

Скорость распространения нормальной зоны в сверхпроводящем проводе с медно-алюминиевой стабилизирующей матрицей

© В.В. Лысенко, О.П. Анашкин

Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва

Поступило в Редакцию 19 декабря 1996 г.

Представлены результаты измерений скорости распространения нормальной зоны в сверхпроводящих проводах с медно-алюминиевой стабилизирующей матрицей. Измерения проведены на модельных катушках, воспроизводящих структуру реальных магнитов, компаундированных и некомпанунированных. Специальная конструкция катушек позволила моделировать одномерное движение нормальной зоны в обмотке.

Характер распространения резистивной зоны в значительной степени определяет процесс разряда сверхпроводящего магнита при переходе в нормальное состояние. Знание скоростей движения нормальной зоны позволяет прогнозировать максимальную температуру, электрические напряжения в обмотке, проектировать систему защиты. Сильная зависимость скорости от электрических и теплофизических свойств проводника, изоляционных материалов, содержания жидкого гелия в обмотке, значительно затрудняет применение расчетных методов.

Движение границы нормальной области вдоль сверхпроводника, несущего транспортный ток, экспериментально изучалось на одиночных проводниках, омываемых кипящим гелием [1,2], а также на идеально теплоизолированных [3]. Такие условия существенно отличаются от ситуации внутри плотно намотанных магнитов, где охлаждение нагретого участка проводника внутри обмотки осуществляется за счет теплового контакта с окружающими витками и, в случае некомпанунированной обмотки, за счет теплосъема в кипящий гелий, некоторое количество которого может находиться в пустотах. Трехмерное распространение нормальной зоны в адиабатических (компанунированных) магнитах экспериментально исследовалось в ряде работ [4], в то же время

динамика нормальной зоны в плотных некомпандинированных обмотках исследована крайне недостаточно. Кроме того, условия нестационарного охлаждения кипящим гелием в узких каналах практически неизвестны.

Данная работа представляет результаты измерения скорости продольного движения нормальной зоны в проводниках со стабилизирующей матрицей из алюминия технической чистоты, плакированного тонким слоем меди [5]. Эксперименты проводились на небольших модельных катушках, воспроизводивших структуру реальных сверхпроводящих магнитов с точки зрения условий охлаждения. Для облегчения анализа экспериментальных результатов моделировалось одномерное движение нормальной зоны вдоль проводника, что достигалось специальной конструкцией модельных катушек. Был использован проводник размером $3.5 \cdot 2 \text{ мм}^2$, толщина медного покрытия — около 50 мкм. Композитный сверхпроводящий провод на основе сплава ниобий–титан диаметром 0.7 мм был запаян в канавке матрицы. Проводник был изолирован полиимидной пленкой, общая толщина изоляции 0.12 мм. Измерения были выполнены для двух марок проводника, отличающихся материалом матрицы: из алюминия технической чистоты марки А5Е и алюминия относительно высокой чистоты А995. Применение алюминия в качестве стабилизирующего материала традиционно было направлено на достижение условий стационарной стабильности, для чего использовался алюминий возможно более высокой чистоты. Данные проводники не отличаются столь высокой электропроводностью и предназначены для работы в магнитах, нестабилизированных стационарно.

Для изучения влияния жидкого гелия, возможно содержащегося в обмотке, эксперименты были проведены с компандинрованными, и с некомпандинрованными катушками. Катушки заливались эпоксидным компаундом ЭД20 методом "мокрой" намотки. В незалитых катушках, учитывая плотную намотку, пустоты занимали по нашим оценкам не более 3% от общего объема. Модельные катушки наматывались на каркасах из текстолита, имели внутренний диаметр 58 мм, наружный 110 мм, длину 80 мм. Число слоев намотки — 12. Рабочим слоем катушки, на котором проводились измерения и только к которому подводился ток, был 5-й слой. Остальные слои обеспечивали граничные условия, моделирующие структуру реального магнита. Пятый слой наматывался параллельно двумя проводами. При измерении ток подавался в один из проводов слоя, второй провод служил тепловым изолятором витков первого. Как показывают расчетные оценки, такая

конструкция позволяет резко снизить влияние поперечной диффузии тепла на продольное движение нормальной зоны, сохраняя характерные для обмотки условия охлаждения нормального участка. На одном конце провода помещался нагреватель из манганина. Вдоль спирали через 0.5 м с пяти внутренних точек снимались потенциалы. Первая из потенциальных точек отстояла от нагревателя примерно на 0.7 м. Шестым потенциалом служила точка выхода провода из катушки. Внешнее магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом с отверстием диаметром 120 мм, снабженным сверхпроводящим ключом. Измерения проводились при "замороженном" внешнем поле. Вся сборка помещалась в испытательный криостат внутренним диаметром 240 мм.

В процессе эксперимента проводник запитывался током заданной величины, с помощью нагревателя инициировалась нормальная зона и проводилась регистрация напряжений на пяти последовательных участках. Для записи процесса использовался шлейфовый осциллограф. Транспортный ток в образце и внешнее магнитное поле были постоянны во времени. Скорость движения нормальной зоны на каждом участке определялась как отношение длины участка к промежутку времени между моментами появления напряжения на данном участке и последующем. Таким образом, скорости движения могли быть рассчитаны для четырех участков, после чего вычислялась средняя скорость на двух внутренних участках. Погрешность определения скорости на каждом из участков, по нашим оценкам, не превышала 15% для большинства точек.

Полученные в данных экспериментах значения напряжения на участке провода, полностью перешедшего в нормальное состояние, позволили определить остаточное удельное сопротивление (усредненное по сечению). Оно составило для провода со стабилизирующей матрицей из алюминия марки А5Е в поперечном магнитном поле 0.2 и 4 Тл соответственно 1.0, 1.2 и $1.4 \cdot 10^{-9}$ Ом · м, а для провода, стабилизированного алюминием А995 — 1.3, 2.9, $3.7 \cdot 10^{-10}$ Ом · м. Величины критического тока обоих проводников оказались близки и составили соответственно 800 и 540 А в магнитном поле 2 и 4 Тл.

Рис. 1 представляет результаты измерений для компаундированной обмотки из проводника со стабилизирующей матрицей из алюминия марки А5Е. Сопоставление экспериментальных значений скорости с результатами численного расчета (расчет проводился методом конечных разностей, использовались реальные температурные зависимости теплоемкости проводника и других параметров) показало, что на дви-

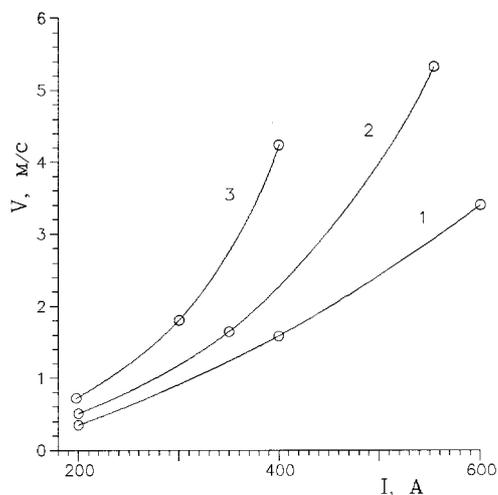


Рис. 1. Скорость распространения нормальной зоны в проводнике, стабилизированном алюминием марки А5Е, в зависимости от тока. Величина внешнего магнитного поля: 0 Тл (1); 2 Тл (2); 4 Тл (3). Компаундированная обмотка.

жение нормальной зоны значительное влияние оказывает охлаждение проводника за счет контакта с соседними витками. Экспериментальные значения оказались ниже в 1.2–3 раза скоростей, рассчитанных в адиабатическом приближении. Интенсивности такого охлаждения соответствуют значения эффективного коэффициента теплоотдачи в интервале $40\text{--}120 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}\text{К}^{-1}$.

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты для не-компаундированных обмоток. Для проводника со стабилизирующей матрицей из алюминия марки А5Е в этом случае скорости оказались в 1.4–3 раза ниже, чем в компаундированной катушке, что можно объяснить присутствием жидкого гелия в обмотке. Это различие тем меньше, чем выше скорость нормальной зоны и слабее влияние охлаждения гелием. Как видно из рис. 2, скорость движения нормальной зоны в проводнике со стабилизирующей матрицей из алюминия А995 значительно ниже, чем в проводнике первого типа (при одинаковых условиях охлаждения): различие составляет от примерно 15 раз в

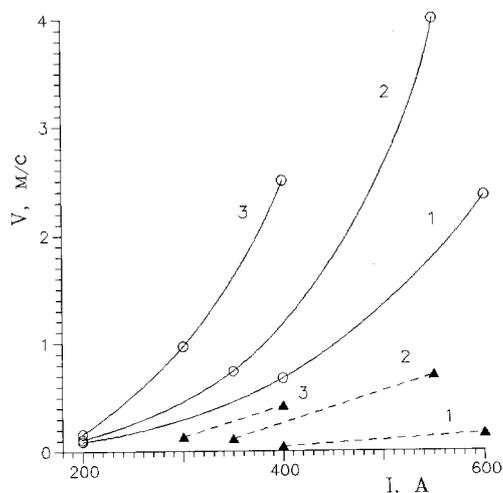


Рис. 2. Скорость распространения нормальной зоны в зависимости от тока. Проводник, стабилизированный алюминием марки А5Е (кружки) и алюминием А995 (треугольники). Величина внешнего магнитного поля: 0 Тл (1); 2 Тл (2); 4 Тл (3). Незамоноличенная обмотка.

собственном поле до 5 раз при максимальных токах в поле 2 и 4 Тл. Отметим, что как следует из теории [6], в адиабатических условиях скорости движения нормальной зоны в этих проводниках были бы примерно равны. Таким образом, небольшое количество содержащегося в обмотке жидкого гелия (до трех объемных процентов) резко меняет динамику нормальной зоны.

Столь низкая скорость распространения нормальной зоны в проводнике, стабилизированном алюминием А995, представляет серьезную опасность с точки зрения защищенности крупных сверхпроводящих магнитов. Крайне неравномерная диссипация запасенной энергии может привести к повреждению обмотки от перегрева. Одним из путей решения этой проблемы является применение в таких обмотках проводников с большим остаточным сопротивлением стабилизирующей матрицы.

Дополнительным преимуществом этих проводников являются существенно лучшие механические свойства.

Работа выполнена при поддержке Научного Совета по проблеме высокотемпературной сверхпроводимости (проект N 93172).

Список литературы

- [1] *Stekly Z.J.J., Hoag E.* // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. P. 1376–1377.
- [2] *Dresner L.* // Cryogenics. 1976. V. 16. P. 675–681.
- [3] *Joshi C.H., Iwasa Y.* // Cryogenics. V. 29. P. 157–167.
- [4] *Gavrilin A.V., Konyukhov A.A., Malginov V.A.* // IEEE Trans. Magn. 1996. V. 32. P. 2990–2993.
- [5] *Анашкин О.П., Ипатов Ю.П., Кейлин В.Е.* и др. // Электротехника. 1991. N 3. С. 17–19.
- [6] *Уилсон М.* Сверхпроводящие магниты. М.: Мир. 1985. С. 405.