

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОК, ПРОТЕКАЮЩИЙ ПО СВЕРХПРОВОДНИКУ ВТОРОГО РОДА

В.В.Сычев, В.Б.Зенкевич, В.В.Андрянов, В.П.Баев

Известно, что в образце из неидеального сверхпроводника второго рода, помещенном в изменяющееся магнитное поле, возникают гистерезисные потери. В отсутствие стороннего тока, протекающего по образцу, эти энергетические потери покрываются, естественно, устройством, создающим переменное магнитное поле. Если по образцу пропускать постоянный ток от какого-либо внешнего источника, то величины гистерезисных потерь должны несколько измениться, поскольку в этом случае изменяется распределение индукции в материале образца. Существенным является вопрос о том, появляется ли при этом некоторое эффективное сопротивление для протекающего постоянного тока (покрывается ли часть гистерезисных потерь за счет источника тока) или, что то же самое, будет ли затухать транспортный ток в замкнутом сверхпроводящем контуре при изменении магнитной индукции в материале, из которого изготовлен этот контур.

Результаты описываемого ниже эксперимента позволили установить, что эффективное сопротивление постоянному току возникает лишь в том случае, когда амплитуда изменений напряженности внешнего магнитного поля превышает некоторое пороговое значение H_p , причем $H_p > H_{c1}$. Проведенный эксперимент выявил также другие закономерности, связанные протеканием постоянного тока по неидеальному сверхпроводнику второго рода, помещенному в переменное магнитное поле.

Схема использовавшейся нами экспериментальной установки приведена на рис. 1. Исследованный образец 1 представляет собой отрезок проволоки из тройного сплава Nb — Ti — Zr (65БТ) диаметром 0,26 мм и длиной 200 м, навитой бифилярно на каркас из диэлектрика. Эта бифилярная катушка являлась частью замкнутого сверхпроводящего контура, вторым элементом которого являлся соленоид 2 с известной индуктивностью.

Ток в рассматриваемом сверхпроводящем контуре возбуждался обычным методом с использованием теплового ключа. Генератором переменного магнитного поля являлся сверхпроводящий соленоид 2, подсоединенный к внешнему источнику переменного напряжения. Возникновение эффективного сопротивления в исследуемом образце при-

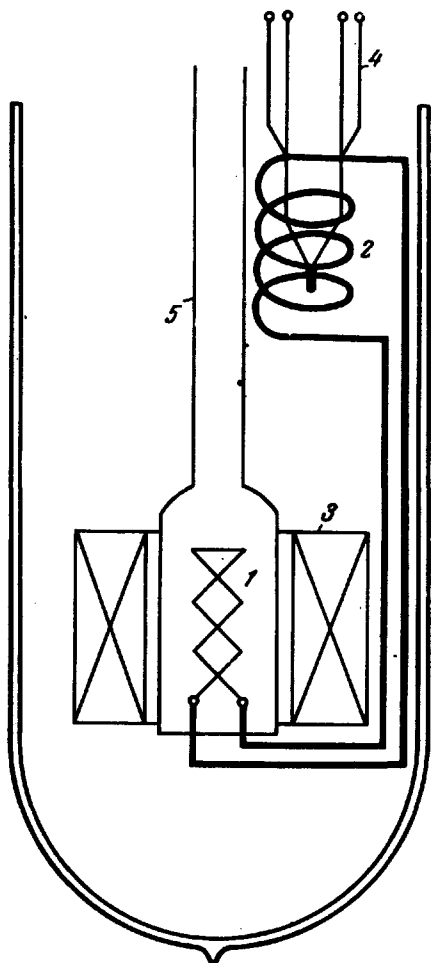


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

водило к затуханию тока в сверхпроводящем контуре, которое фиксировалось с помощью висмутового датчика 4, помещенного в соленоид 2. По скорости падения тока в контуре можно рассчитать эффективное сопротивление исследуемого образца и величину той доли мощности тепловыделения, которая покрывается за счет источника тока (в данном случае за счет энергии магнитного поля, запасенной в соленоиде 2). Исследуемый образец помещался в трубку 5, присоединенную к объемному газовому расходомеру. Это давало возможность приблизительно оценить общее тепловыделение в образце.

Для того, чтобы на результаты эксперимента не влиял перегрев образца, изменение магнитного поля проводилось с низкой частотой (0,02 – 0,06 Гц).

С помощью этой установки можно было, проводя опыт в течение длительного интервала времени, фиксировать достаточно малые значения среднего сопротивления: чувствительность по удельному сопротивлению при двухчасовом опыте составляла $10^{-18} \text{ ом} \cdot \text{см}$; с учетом неопределенности, связанной с нелинейностью параметров соленоида 3, погрешность измерения удельных сопротивлений порядка $10^{-14} \text{ ом} \cdot \text{см}$ составляла несколько процентов.

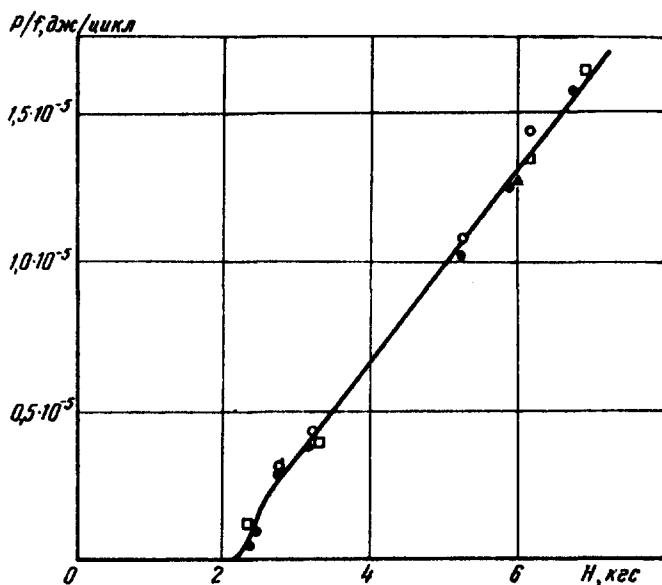


Рис. 2. Энергия, затрачиваемая источником тока за цикл, в функции амплитуды переменного поля. Начальный ток 20 а. о – 0,025 кэс , ● – 0,030 кэс , Δ – 0,040 кэс , □ – 0,050 кэс , ▲ – 0,060 кэс

В проведенных опытах магнитное поле изменялось циклически вокруг нулевого среднего значения. Амплитуда колебаний магнитного поля менялась в пределах 0 – 7 кэс . В стационарных полях такой напряженности никакого затухания тока в контуре не наблюдалось.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. При токе в образце, равном $I_0 = 20 \text{ а}$, пороговое значение амплитуды магнитного поля, при котором возникает эффективное сопротивление, составляет 2,1 кэс . Пороговое значение амплитуды поля несколько возрастает с уменьшением тока. Точный вид зависимости

H_p от тока в образце не был установлен ввиду того, что для фиксирования малых сопротивлений вблизи H_p требуется слишком большая продолжительность опыта.

2. При амплитудах, заметно больших H_p (для $I_0 = 20$ а, начиная с 2,5 кэ), эффективное сопротивление линейно возрастает с ростом амплитуды. Разумеется, такая же линейная зависимость имеет место и для средней (при данном значении I_0) мощности, затрачиваемой источником тока, причем средняя мощность тепловыделения пропорциональна частоте колебаний поля и тепловыделение в расчете на один цикл от частоты не зависит (рис. 2; значению тепловыделения за счет работы источника тока 10^{-5} дж/цикл соответствует среднее удельное сопротивление $\rho = 3,7 \cdot 10^{-13}$ ом·см при частоте 0,03 кГц).

3. В области линейной зависимости мощности источника тока от амплитуды поля эффективное значение сопротивления в пределах точности эксперимента не зависит от величины тока, протекающего по образцу (ток в опытах изменялся в интервале 2 – 20 а).

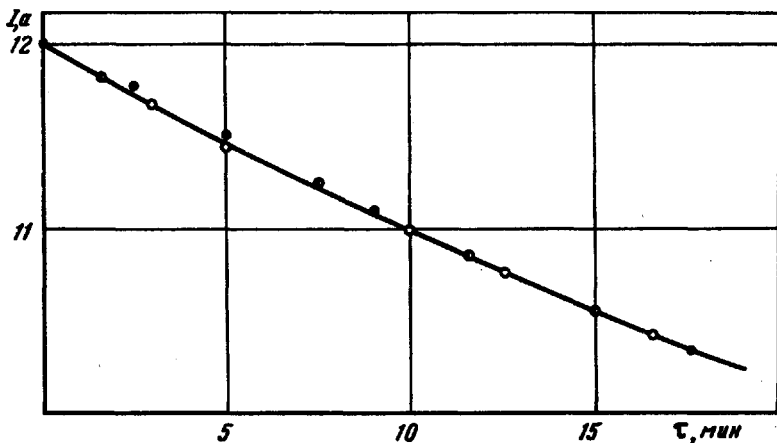


Рис. 3. Затухание тока в сверхпроводящем контуре при различной форме импульсов переменного магнитного поля: - ○; - ●; - ●

4. Эффективное значение сопротивления не зависит от формы импульсов поля и определяется исключительно амплитудой изменения напряженности поля. На рис. 3 показан характерный пример затухания тока в сверхпроводящем контуре для почти прямоугольных и треугольных импульсов поля. Использовались прямоугольные импульсы двух различных видов, существенно различающиеся по среднеквадратично-

му значению напряженности поля. Амплитуда изменения напряженности поля равнялась 6 кэ.

5. Измерения количества испаряющегося гелия показали, что тепловыделение, покрываемое за счет источника тока, по порядку величины не превышает в проведенных опытах 10% от тепловыделения, покрываемого генератором поля. Тепловыделение, связанное с генератором поля, не претерпевает скачкообразного изменения при уменьшении амплитуды поля ниже порогового значения.

К проведенному исследованию наиболее близка работа [1]. В работе [1] наблюдалось возникновение сопротивления в проволочном образце из неидеального сверхпроводника второго рода при изменении внешнего магнитного поля. Наличие порогового значения амплитуды изменения поля не было установлено. Полученный экспериментальный материал не позволил автору [1] квалифицировать возникновение сопротивления как существенно новое явление, отличное от наблюдавшихся ранее резистивных состояний.

Авторы благодарны Ф.Ф.Терновскому и М.Г.Кремлеву за ценные обсуждения.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
20 ноября 1968 г.

Литература

[1] В. Taquet. J. Appl. Phys., 36, 3250, 1965.