

7-
объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

6208/2-80

22/12-80
P8-80-575

В.М.Дробин, Е.И.Дьячков, Ю.В.Куликов,
Е.К.Курятников, В.Г.Луппов, В.А.Малюк,
А.А.Смирнов, Ф.Хованец, И.С.Хухарева, Л.Яншак

ПОТЕРИ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЯХ
В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Направлено в ЖТФ

1980

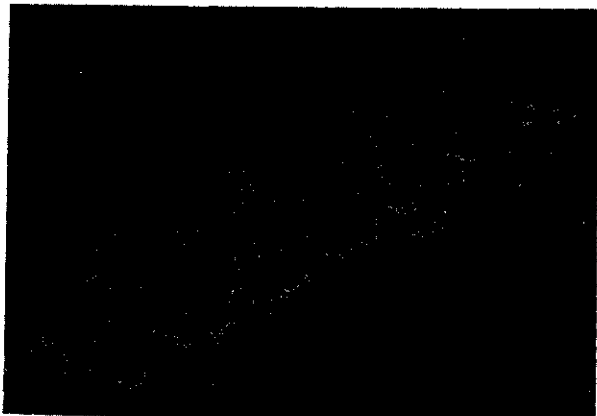
В рамках программы создания сверхпроводящего ускорителя выполнены исследования тепловыделений в различного типа сверхпроводящих кабелях, помещенных во внешнее магнитное поле. Измерения проводились в приборе, описанном ранее^{1/}, на коротких образцах без транспортного тока. Максимальная амплитуда магнитного поля могла меняться от 0 до 2 Т, скорость изменения - от 0 до 8 Т/с, импульсы были треугольной формы. Измерения проводились при температуре 4,2 К. Было использовано три типа образцов: 1/ пучок изолированных проводов; 2/ двухслойная плоская скрутка из проводов, предварительно облуженных тем или иным припоем, затем спаянных между собой за счет полуды, либо основательно замоноличенных тем же припоем; 3/ трубчатые образцы с однослойным навивом облуженных проводов с пропайкой или без нее. Во всех случаях исходным материалом служил мелкодисперсный провод со сверхпроводящими нитями из НТ-50 и однокомпонентной матрицей из меди. Поперечные сечения образцов второго и третьего типа даны на рис.1 в увеличенном виде. Характеристики всех измерявшихся образцов представлены в таблице. Магнитное поле было направлено перпендикулярно продольной оси образцов, для плоской скрутки устанавливались две ориентации поля: перпендикулярная и параллельная относительно широкой стороны образца. Во всех последующих рисунках значение потерь дается на единицу объема мелкодисперсного провода.

1. ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА

Измерения на пучках изолированных проводов явились исходными для всех остальных образцов, так как в этом случае полностью исключены кооперативные потери, вызванные наведенными токами между проводами в кабеле.

На рис.2 представлены зависимости энергии потерь (W) от скорости изменения поля (\dot{B}) для образцов с разным шагом твиста (ℓ_P). Видно, что зависимости $W(\dot{B})$ близки к линейным и сильно возрастают с увеличением ℓ_P . Как следует из рис.3, вихревые потери в этих образцах соответствуют соотношению, известному для одиночного композитного провода: $W_e \sim \ell_P^2$ /см. работу^{1/2/}.

а



б

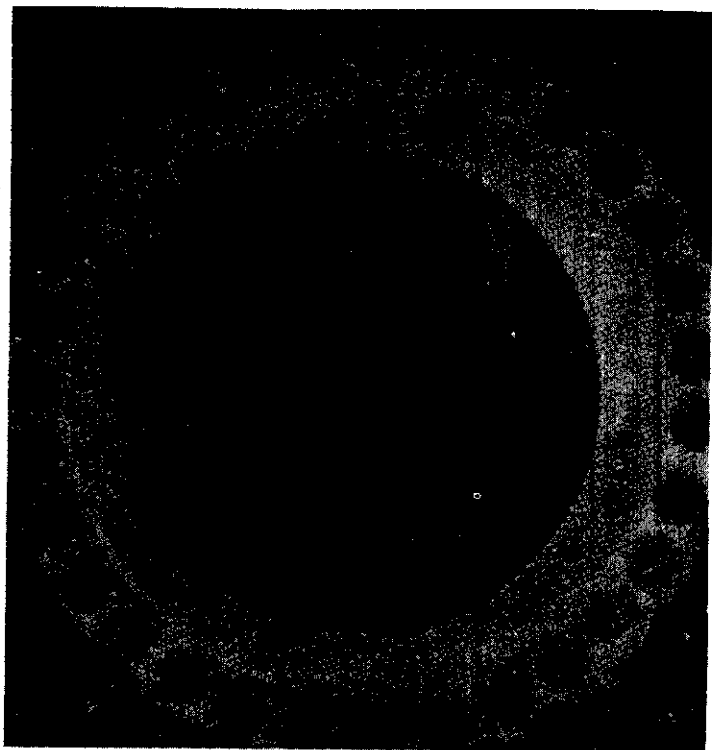


Рис.1. Фотографии поперечного сечения образцов:
а/ двухслойная плоская скрутка /увелич. в 20 раз/;
б/ трубчатый образец /увелич. в 18 раз/.

Таблица

№ обр.	Тип образца	Сечение мм ²	Кол-во пров.	Ф пров. мм	Шаг трансп. мм	Способ соедин. в кабеле	Ф спн мм	Число спн	Шаг твиста спн мм
2.	Плоская скрутка	3,8x0,92	13	0,5	20	замониличен ПСО-40	10	1045	4-4,5
6.	- " -	9,6x1,7	23	0,85	68	не пропаян	17	- " -	18
7.	- " -	3,8x0,92	13	0,5	20	замониличен ПСО-5-95	10	1064	4
9.	- " -	4,4x1,0	15	0,5	32	- " -	10	1045	нет
10.	- " -	- " -	15	0,5	32	слабо спаян ПСО-5-95	10	- " -	нет
14.	- " -	- " -	15	0,5	32	- " -	10	- " -	4,5-5
15.	- " -	6,3x0,98	23	0,5	36-40	- " -	25	168	15-16
20.	- " -	- " -	23	0,5	36-40	замониличен ПСО-5-95	25	168	15-16
5	Трубка	6x3,8	31	0,5	31	замониличен ПСО-5-95	10	1045	4-4,5
21	- " -	- " -	31	0,5	31	не пропаян	10	1045	4,5-5,0
5	пучок изолир. пров.		29	0,5		изолир. пров.	10	1045	4-4,5
11	- " -		41	0,5		- " -	10	- " -	28
17	- " -		73	0,5		- " -	10	- " -	8
18	- " -		73	0,46		- " -	10	- " -	12
19	- " -		10	1,2		- " -	110	61	20

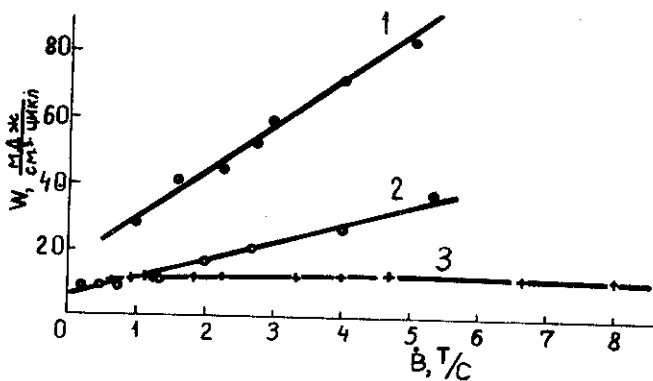


Рис. 2. Зависимость энергии потерь от скорости изменения поля. $B = 0,5$ Т. 1 - обр. № 11, $l_p = 28$ мм; 2 - обр. № 18, $l_p = 12$ мм; 3 - обр. № 5^{II}, $l_p = 4 \div 4,5$ мм.

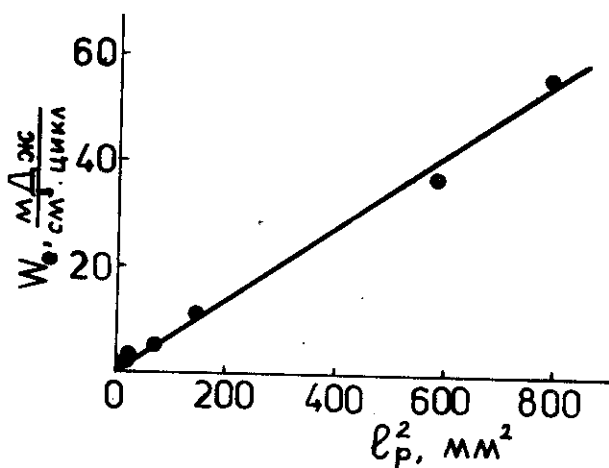


Рис. 3. Зависимость вихревых потерь от квадрата шага твиста. $B = 1$ Т; $\dot{B} = 1$ Т/с.

На рис. 4 даны зависимости гистерезисных потерь W_h от магнитного поля образцов, различающихся диаметром сверхпроводящих нитей ($d_{СПН}$). С увеличением $d_{СПН}$ зависимость от поля становится сильнее. Функция $W_h(d_{СПН})$ практически линейная /рис. 5/, что также согласуется с формулой для одиночного мелкодисперсного провода^{2/}.

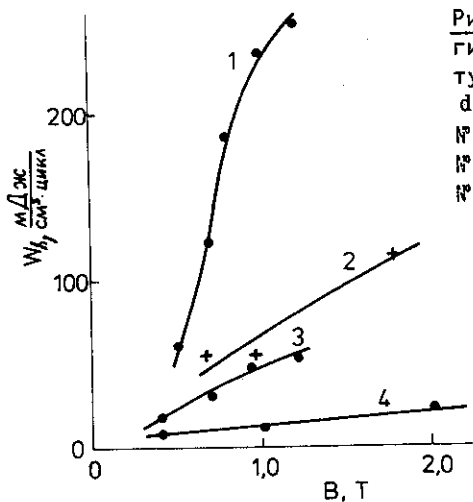


Рис. 4. Зависимость энергии гистерезисных потерь от амплитуды поля: 1 - обр. № 19, $d_{СПН} = 110$ мкм; 2 - обр. № 15, $d_{СПН} = 25$ мкм; 3 - обр. № 6, $d_{СПН} = 17$ мкм; 4 - обр. № 18, $d_{СПН} = 10$ мкм.

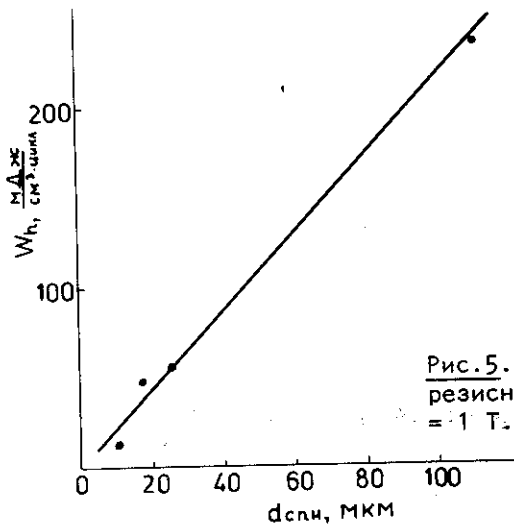


Рис. 5. Зависимость энергии гистерезисных потерь от $d_{СПН}$. $B = 1$ Т.

2. ПЛОСКИЕ СКРУТКИ

Использовавшиеся образцы этого типа отличались друг от друга числом проводов, способом их крепления, диаметром сверхпроводящих нитей, составом припоя и другими свойствами /см. табл./ . На рис. 6 приведены зависимости $W(B)$ для двух серий образцов /а и б/, в каждой из которых один замонотичен припоем, в другом проводники механически скреплены за счет

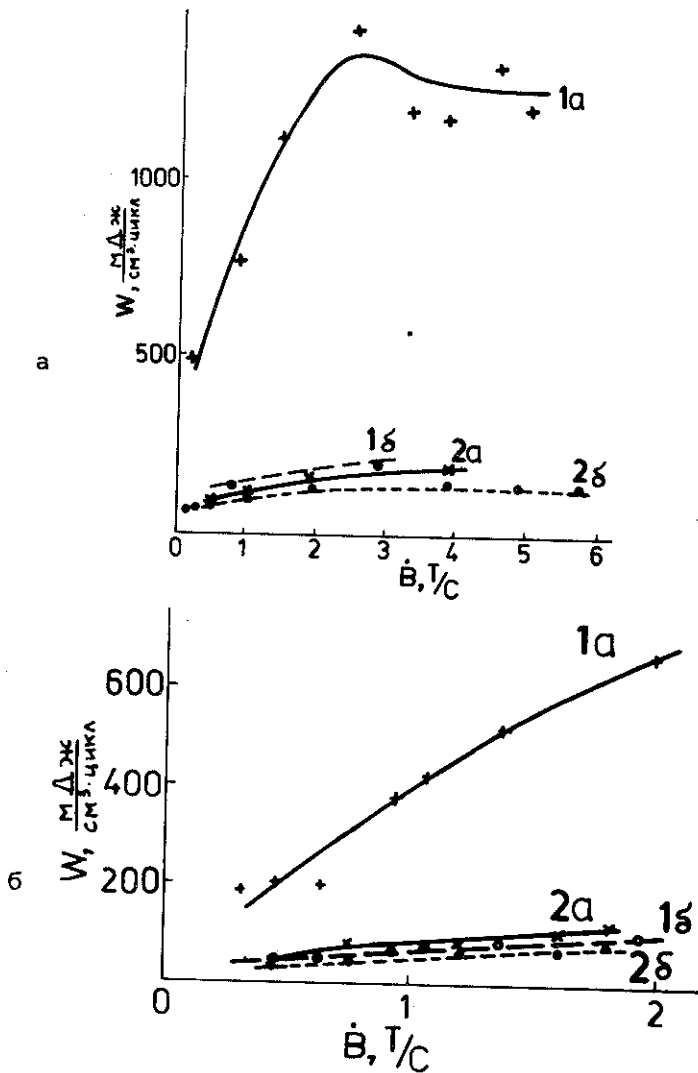


Рис. 6. Сравнение потерь для пропаянных и непропаянных плоских скруток $B = 1$ Т: а/ 1а и 1б - обр. № 20, пропаянный, в перпендикулярном и параллельном поле соответственно. 2а и 2б - обр. № 15, непропаянный, B_{\perp} и B_{\parallel} соответственно; б/ 1а и 1а - обр. № 9, пропаянный, в B_{\perp} и B_{\parallel} соответственно: 2а и 2б - обр. № 10, непропаянный, в B_{\perp} и B_{\parallel} соответственно.

полуды /в дальнейшем такой образец для краткости будет называться слабо пропаянным/. В обоих случаях у замоноличенных образцов имеет место сильная анизотропия потерь, так что значения этих потерь при перпендикулярной ориентации существенно выше, чем при параллельной /например, при $\dot{B} \approx 1$ Т/с примерно в 6 раз/. У непропаянных образцов потери слабо зависят от направления поля, а по абсолютной величине почти совпадают с параллельной ориентацией хорошо пропаянных образцов и пучком изолированных проволок /сравни 1б, 2а, 2б с кривой 1 рис. 2/. При больших значениях \dot{B} /рис. 6а/ на кривых $W(\dot{B})$ наблюдается тенденция к насыщению.

На рис. 7 представлены $W(\dot{B})$ для непропаянных скруток, различающихся диаметром сверхпроводящих нитей или шагом твиста

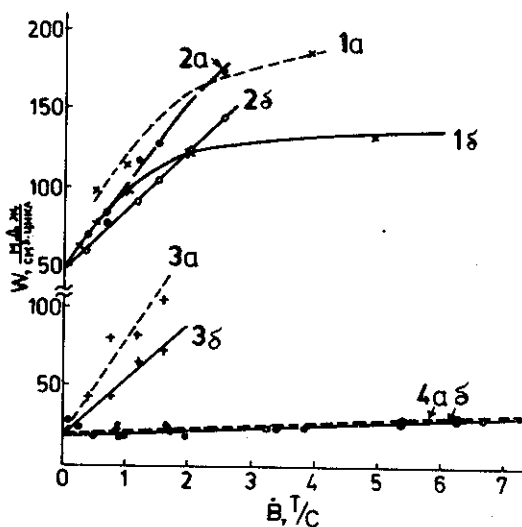


Рис. 7. Зависимость потерь от \dot{B} для непропаянных плоских скруток. $B = 1$ Т. 1 - обр. № 15; 2 - обр. № 6; 3 - обр. № 10, 4 - обр. № 14. Индекс "а" соответствует перпендикулярной ориентации поля, "б" - параллельной.

СПН. Видно, что с увеличением $d_{СПН}$ потери растут. Значительную роль в таких образцах играет шаг твиста СПН. Так, у образца № 14 /кривая 4, $d_{СПН} = 10$ мкм, $l_p \approx 5$ мм/ почти отсутствует зависимость потерь от \dot{B} , тогда как у образца № 10 с таким же $d_{СПН} = 10$ мкм, но шагом твиста существенно

большим: $l_p \approx L_p$ /собственно твист СПН отсутствует, поэтому l_p совпадает с шагом транспозиции скрутки/ эта зависимость достаточно сильная /кривые 1а, б/.

Как следует из рис.8, на котором даны $W(\dot{B})$ для скруток, замоналиченных различными припоями, потери при перпендикулярной ориентации поля зависят от удельного сопротивления припоя; при параллельной ориентации эта зависимость проявляется очень слабо.

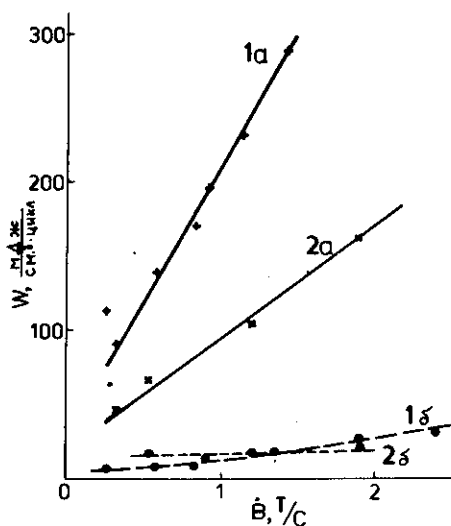


Рис.8. Зависимость энергии потерь от скорости изменения поля для плоских скруток, пропаянных различными припоями. $B = 1$ Т. 1 - обр. № 7, 2 - обр. № 2; индекс "а" соответствует перпендикулярной ориентации поля, "б" - параллельной.

3. ТРУБЧАТЫЕ ОБРАЗЦЫ

На рис.9 представлены $W(\dot{B})$ для трубчатых образцов с пропайкой /обр. № 5/ и без нее /обр. № 21/. Для сравнения там же приведены результаты для пучка изолированных проволок /обр. № 5"/. Видно, что пропайка сильно увеличивает как абсолютные значения потерь, так и зависимость от скорости изменения по-

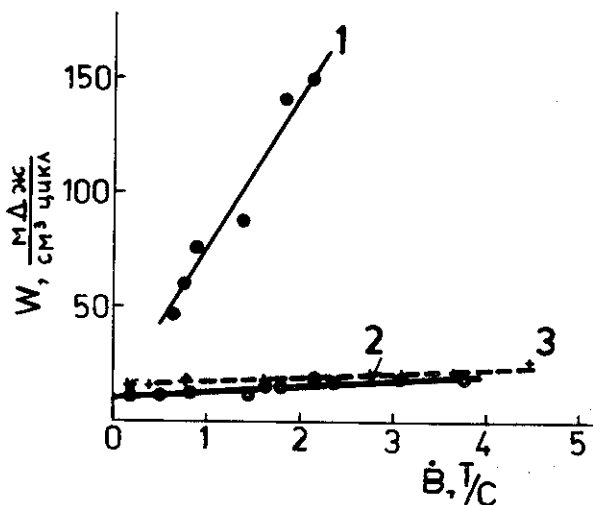


Рис.9. Зависимость энергии потерь от скорости изменения поля для трубчатых образцов. $B = 1 \text{ Т}$. 1 - обр. № 5, 2 - обр. № 5^{II}; 3 - обр. № 21.

ля. У непропаянного образца $W(\dot{B})$ совпадает с пучком изолированных проволок /кривые 2,3/, небольшое различие в наклоне кривых можно отнести за счет неполной идентичности исходного провода.

Из приведенного экспериментального материала можно сделать следующие выводы:

1. Образцы в виде пучка изолированных проводов удовлетворительно следуют закономерностям, выведенным для одиночного композитного провода. Гистерезисные потери в таких образцах пропорциональны диаметру сверхпроводящих нитей и имеют логарифмическую зависимость от магнитного поля. Вихревые потери пропорциональны ℓ_p^2 .

2. Для образцов в виде плоских скруток, замоналиченных припоем, характерна сильная анизотропия потерь, так что при перпендикулярной ориентации поля потери в несколько раз выше, чем при параллельной. Это различие растет с увеличением скорости изменения поля.

3. Анизотропия потерь сильно уменьшается, если скрутка пропаяна слабо или не пропаяна совсем. В этом случае кооперативные потери для обеих ориентаций (B_{\perp}, B_{\parallel}) при всех скоростях близки к соответствующим значениям для пучка изолированных проводов. Для хорошо пропаянной скрутки к этой величине

не приближаются по абсолютному значению потери в параллельном поле.

4. Кооперативные потери в плоских образцах при перпендикулярной ориентации поля сильно зависят от контактного сопротивления между проводниками. Это сопротивление можно увеличить за счет припоя с высоким удельным сопротивлением или формирования кабеля без сильной пропайки. Для хорошо пропаянных образцов кооперативные потери возрастают с увеличением ширины плоскости образца, перпендикулярной магнитному полю /см. рис. 6а и б/.

5. Потери в плоских скрутках зависят от диаметра сверхпроводящих нитей и шага твиста количественно так же, как и у изолированных проводов.

6. У трубчатых образцов вариант с пропайкой дает сильную зависимость от скорости изменения поля. Для непропаянной трубки потери по абсолютной величине и зависимости от B близки к пучку изолированных проводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дробин В.М. и др. ОИЯИ, Р13-12052, Дубна, 1978; ПТЭ, 1980, №3, с.203.
2. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. "Мир", М., 1976, гл.4.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 августа 1980 года.