

С 3933  
Г-657

МТЭ, 1967, №2,  
с. 236-239

16/11-66

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2533



И.Н. Гончаров

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ МАГНИТ  
ИЗ Nb -75% Zr НА 85 КГС

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

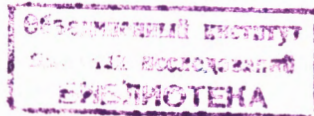
1965

3943/1 ср.

И.Н. Гончаров

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ МАГНИТ  
ИЗ Nb -75% Zr НА 85 КГС

Направлено в ПТЭ



К настоящему времени подавляющее большинство сверхпроводящих соленоидов изготовлены из сплава Nb - Zr с содержанием Zr меньше 50%<sup>/1,2,3/</sup>. Это объясняется тем, что у этих сплавов в холоднодеформированном состоянии критическая плотность тока,  $j_c$ , в полях 30-40 кгс составляет  $(5-8) \cdot 10^4$  а/см<sup>2</sup> /4,5/. Термообработка этих сплавов приводила к столь большим токовым неустойчивостям, что применение их в обычных соленоидах оказывалось невозможным<sup>/8/</sup>. У холоднодеформированных сплавов Nb - Zr на основе Zr  $j_c$  гораздо ниже, а верхнее критическое поле гораздо выше, чем у сплавов на основе Nb<sup>/7,8/</sup>.

Однако, как было показано в<sup>/9,10/</sup>, с помощью специальной термообработки  $j_c$  этих сплавов можно увеличить в несколько десятков раз, причем неустойчивости практически отсутствуют. Это связано с тем, что оптимальным для этих сплавов является низкотемпературный отжиг (400-500°С), при котором выделения, стабилизирующие  $j_c$ <sup>/11,12/</sup>, весьма мелкодисперсны.

В настоящей работе описан магнит, состоящий из комбинации сверхпроводящего соленоида и пары полюсных наконечников, вставленных внутрь. Магнит предназначен для измерения критических токов сверхпроводящих образцов во внешнем поперечном магнитном поле напряженностью до 85 кгс.

Соленоид состоит из двух концентрически расположенных секций, намотанных на отдельных каркасах (рис. 1), причем секция В легко вынимается из соленоида. Секция D = D<sub>1</sub> + D<sub>2</sub> состоит из двух подсекций, которые можно запитывать током раздельно.

Характеристика соленоида представлены в таблице. Для его изготовления потребовалось ≈ 350 г сверхпроводящего сплава.

В качестве материала для обмотки соленоида использована проволока из Nb - 75% Zr, протянутая в медной трубке так, что в результате на поверхности проволоки получился слой меди, находящийся в очень хорошем электрическом и тепловом контакте с Nb - Zr керном. В секции D использована проволока № 510 с диаметром зерна 0,29 мм, толщиной меди 0,055 мм, подвергнутая окончательному отжигу

при  $500^{\circ}\text{C}$  в течение 45 минут. Сверху проволока покрыта лаковой изоляцией. Проволока № 520 для секции В была подвергнута промежуточному отжигу (на  $\phi$  0,5 мм) при  $475^{\circ}\text{C}$  1 час, а затем протянута до  $\phi$  0,33 мм (по керну). Толщина медного покрытия 0,07 мм. Зависимость  $j_c(H)$  этих проволок представлена на рис. 2.

Обе секции соленоида имели сверхпроводящие перемычки И (рис. 1) для работы в короткозамкнутом режиме при отключенном внешнем источнике. Во время ввода тока в соленоид перемычки переставались с помощью контактного нагревателя И, намотанного вокруг Nb-Zr проволоки и покрытого сверху клеем БФ-2. Сами перемычки размещались в перевернутых стаканчиках из тефлона или текстолита. Для перегрева погруженных в гелий перемычек выше  $T_c$  требовалась мощность в нагревателе  $\approx 0,05$  вт при  $4,2^{\circ}$  и  $\approx 0,25$  вт при  $1,8^{\circ}\text{K}$ .

Для создания сверхпроводящего контакта проволоке зачищалась, скручивалась и зажималась между полуженными медными блоками размером  $13 \times 13 \times 5$  мм<sup>3</sup>, причем участки проволоки, лишенные меди, шунтировались медной проволокой, что избежать перегорания при переходе соленоида в нормальное состояние. К блокам подпаивались потенциальные и токовые подводы. В качестве последних использовались кабели, скрученные из покрытой медью сверхпроводящей проволоки и неизолированной медной проволоки достаточной толщины. Такая комбинация позволяет избежать закипания гелия при пропускании сильных токов, и в то же время ограничить теплоприток по проводам в разумных пределах. Блоки и перемычки были закрыты медным экраном так, что соленоид мог работать в короткозамкнутом режиме даже тогда, когда уровень гелия опускался ниже перемычек на 5-8 см. Для питания отдельных секций соленоида применялись аккумуляторные батареи и транзисторные регуляторы тока. Моторная регуляторка позволяла плавно вводить токи с заданной скоростью. Полное время ввода тока в соленоид при последовательном питании не превышало 3 мив. Индуктивное напряжение контролировалось милливольтметрами, подключенными параллельно с перемычками (рис. 1). Специальная автоматика в пульте управления отключала ток при переходе соленоида в нормальное состояние. Чтобы избежать возникающих при переходе высоких напряжений на входе транзисторных регуляторов тока, соленоид был шунтирован диодами и активным сопротивлением Ш, как показано на рис. 1. Это позволяло часть энергии, выделяющейся при переходе, превращать в тепло в криостата.

В центральное отверстие соленоида  $\phi$  18 мм через специальный люк в верхнем фланце криостата можно было вводить по желанию либо шток с полюсами - вставки и блоками для крепления образцов; либо шток с измеримыми соленоидами; либо устройства для измерения поля; либо, наконец, специальный трубчатый сосуд Дьюара, с помощью которого магнитное поле можно было иметь при комнатной температуре

(нижняя часть сосуда Дюара имела внутренний  $\phi 11,5$  мм). Ввиду отсутствия экрана с промежуточной температурой внутреннюю область "хвоста" этого сосуда приходилось слегка подогревать, контролируя температуру с помощью терморпары.

Для абсолютного измерения магнитного поля использовались флюксометры типа М19 и микроберметры типа Ф18. Десять измерительных катушек было откалибровано при комнатной температуре в магнитном поле  $\leq 18$  кГс, которое измерялось с помощью прибора ИМИ-2 по протонному резонансу. Как показали измерения, постоянные катушек увеличивались при  $4,2^{\circ}\text{K}$  по сравнению с комнатными температурами не более, чем на 1%. В качестве вторичных датчиков служили магнетосопротивления из меди и датчики Холла. Одно из магнетосопротивлений было намотано в центральной части каркаса секции В под обмоткой и служило для постоянного контроля за полем соленоида (М на рис. 1). Критические токи разных комбинаций секций соленоида были измерены при  $4,2^{\circ}$ , а некоторые – и при  $1,7^{\circ}\text{K}$ . Результаты (с учетом поправки на увеличение поля при смещении по радиусу от оси соленоида к первому слою обмотки<sup>/13/</sup>) представлены на рис. 2 вместе с кривыми  $j_c(H)$  для коротких образцов тех же проволок. Там же приведены коэффициенты деградации, которые определяются как отношение критического тока в коротком образце при соответствующем поле к критическому току в соленоиде. Видно, что при  $4,2^{\circ}\text{K}$  они мало отличаются от единицы, что свидетельствует о высокой токовой стабильности материала (ср., например, с данными<sup>/11/</sup>).

Об этом же говорят и тот факт, что критический ток соленоида не уменьшился при понижении температуры вплоть до  $1,8^{\circ}\text{K}$ , хотя, как правило,  $j_c$  соленоидов из Nb - Zr сплавов при этом существенно уменьшается<sup>/14,15/</sup>. Критический ток описываемого соленоида проходил через максимум (46а) в районе  $4,05 - 3,8^{\circ}\text{K}$ , а затем несколько понижался (до 42-43а при  $2,5^{\circ}\text{K}$ ). В жидком гелии II наблюдался разброс от 42 до 47а. "Эффекты тренировок", т.е. увеличение  $j_c$  при последующих вводах тока в соленоид, отсутствовали.

Для выбора оптимального режима питания соленоида были сняты зависимости критического тока во внутренней секции от тока в наружной. Для пар D1 - D2 и B - (D1 + D2) максимальное поле получалось при почти одинаковых токах в каждой секции = 43а (рис. 3). Таким образом, поле, близкое к максимальному для всего соленоида в целом, создавалось при последовательном питании секций D и B. Если внутри размещалась еще секция А (из той же проволоки, что и В), то максимальное поле (при  $T = 1,7^{\circ}\text{K}$ ) 62 кГс получалось при 40а в D + B и 58а в секции А.

Для получения более высокого поля, необходимого для измерения сверхпроводящих образцов, вместо секции А в соленоид помещалась пара полюсов-вставок из

пермендюра. Диаметр полюса 17 мм; диаметр полюсных наконечников 6 мм; длина 38 мм; угол между осью и срезом  $60^\circ$ , зазор между полюсами 1,1 мм. Максимальный вклад полюсов в общее поле магнита, определенный с помощью малогабаритного датчика магнетосопротивления, а также путем сравнения  $j_c(H)$  нескольких образцов, оказался равным 27,5 кгс. Суммарное поле магнита в зависимости от тока в секциях D+B приведено на рис. 4.

Следует отметить, что несмотря на столь большое увеличение поля в зазоре между полюсами, критический ток соленоида даже несколько возрастал. Так, например, критический ток одной секции В без полюсов был 58а, а с полюсами возрастал до 65,5а. Это связано с тем, что, как показали прямые измерения, обратный ток индукции от намагниченных полюсов уменьшает поле соленоида в области расположения внутренних витков обмотки, что, в свою очередь, приводит к росту  $j_c$  всего соленоида и, следовательно, к росту суммарного поля в зазоре между полюсами.

При переходе соленоида в нормальное состояние испаряется около  $300 \text{ см}^3$  жидкого гелия. Соленоид выдержал уже несколько десятков переходов без какого бы то ни было ухудшения свойств.

Таким образом, проверка свойств термообработанного сплава Nb - 75% Zr в качестве материала обмотки соленоида подтвердила его высокую стабильность и эффективность. Можно думать, что подобный материал найдет себе применение и при изготовлении более крупных соленоидов, особенно если учесть его сравнительно невысокую стоимость, высокое верхнее критическое поле и пластичность, позволяющую получать медное покрытие способом плакирования. Последнее обстоятельство особенно важно при массовом производстве кабелей, состоящих из большого количества омедненных сверхпроводящих проволок, отличающихся повышенной эффективностью.

В заключение автор выражает признательность В.Я.Филькину, Ю.Ф.Бычкову и Б.Н.Самойлову за помощь при изготовлении и изоляции проволоки, А.Г.Зельдовичу за постоянное внимание к работе, В.М.Дробяну, А.П.Коростелеву, А.М.Каспину, Л.В.Петровой, И.С.Хухаревой и В.Ф.Чумакову за помощь в работе, а также коллективу эксплуатации ожижительных установок криогенного отдела Лаборатории высоких энергий за бесперебойное снабжение жидким гелием.

#### Л и т е р а т у р а

1. J.K. Hulm, B.S. Chandrasekhar, H.Riemersma, Adv. Cryogen. Engng. 8, 17 (1963).
2. T.G. Berlincourt, Brit. J. Appl. Phys., 14, 749 (1963).
3. C.Laverick, Cryogen., 5, 152 (1965).

4. C.Laverick. Adv. Cryogen. Engng., 9, 321 (1964).
5. Y.B. Kim, Phys. To-day, 17, 21 (1964).
6. M.S. Lubell, R.S. Chandrasekhar, G.T. Mallick, Appl. Phys. Lett., 3, 79 (1963).
7. H.Riemersma, J.K. Hulm, A.J. Venturino, B.S. Chandrasekhar, J. Appl. Phys., 83, 3499 (1962).
8. T.G. Berlincourt, R.R. Hake, Phys. Rev. Lett., 9, 293 (1962).
9. Ю.Ф. Бычков, И.Н. Гончаров, В.И. Кузьмин, И.С. Хухарева, ПТЭ, №2, 170 (1984).
10. Ю.Ф. Бычков, И.Н. Гончаров, И.С. Хухарева. ЖЭТФ, 48, 818 (1965).
11. P.W. Anderson, Phys. Rev. Lett., 9, 309 (1962).
12. P.W. Anderson, Y.B. Kim. Rev. Mod. Phys., 36, 39 (1964).
13. R.W. Boom, R.S. Livingston, Proc. IRE, 50, 274 (1961).
14. D.N. Cornish, E.C. Williams. 1964 Cryogen. Engng. Conf., August, (1964).  
(см. перевод "Сверхпроводящие соленоиды," Мир, 1965, стр. 229).
15. R.W. Meyerhoff, B.N. Heise, Proc. of the Type II Superconductors Conference, Cleavland, 2, IV-2 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 декабря 1985 г.



Таблица  
характеристики соленоида  
из Nb-75Zr

секция	внутр Ф мм	нар Ф мм	длина мм	число витков	коэф запол- нения	Ф проб Nb-Zr мм	площ сечен. 10 <sup>-4</sup> см <sup>2</sup>	Н/Г кгс/д	крит ток (4,2°К) а	Н кгс
A	9	18	48	728	0,29	0,33	8,5	0,19	>90	>17
B	20	38	64	2145	0,28	0,33	8,5	0,41	60	24,5
D	42	61	74	3480	0,33	0,29	6,6	0,54	58	30,8
D <sub>2</sub>	61	75	74	2393	0,33	0,29	6,6	0,30	54	16,2

секция	соединение и питание	T °К	крит ток а	Н кгс
D <sub>1</sub> + D <sub>2</sub>	последовательно	4,2	4,36	36,6
B + D	последовательно	4,2 4,05	42,5 46	53 57,5
(B + D) + A	питание раздельно	4,2	40 42	58
(B + D) + A	питание раздельно	1,7	41 58	62
Вклад полюсов (при I <sub>сол</sub> > 2 а)				27,5
B + D + полюса			4,05	85

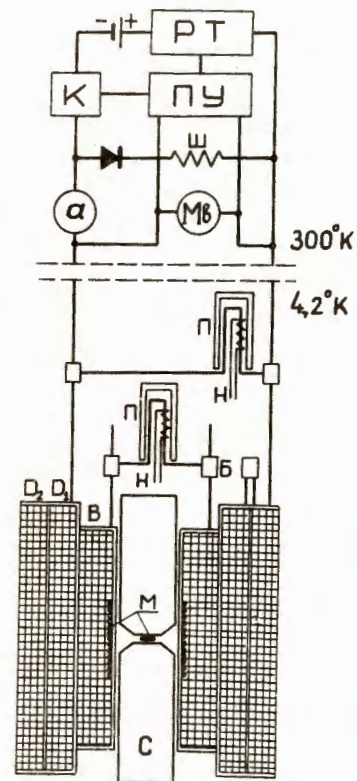


Рис. 1. Блок-схема управления соленоидом.  
РТ - регулятор тока; К - контактор; ПУ - пульт управления; Ш - наружный шунт; П - сверхпроводящая перемычка; Н - нагреватель; Б - зажимные блоки; М - датчики магнетосопротивлений; С - сердечники - полюса.



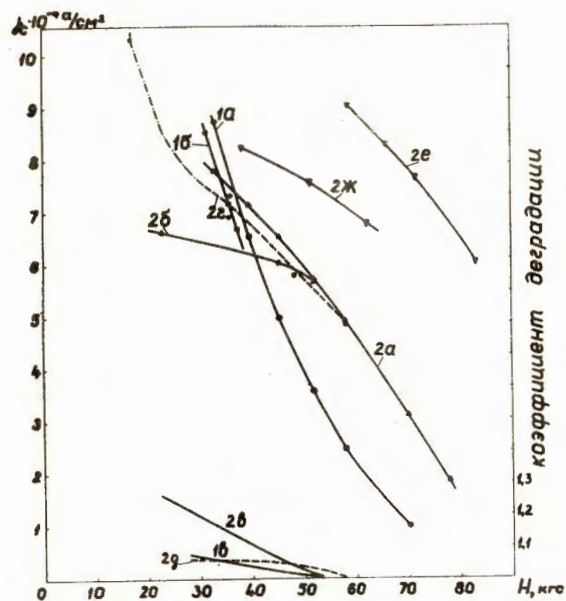


Рис. 2. Зависимость критической плотности тока от поля в соленоидах и в коротких образцах из той же проволоки.

$T=4,2^{\circ}\text{K}$ . Проволока № 510: 1а - кор. образец; 1б - соленоид D1; 1в - коэффициент деградации D1; Проволока № 520: 2а - кор. образец; 2б - соленоид В; 2в - коэф. деградации В; 2г - соленоид А; 2д - коэф. деградации А.

$T=1,7^{\circ}\text{K}$ . Проволока № 520: 2е - кор. образец; 2ж - соленоид А.

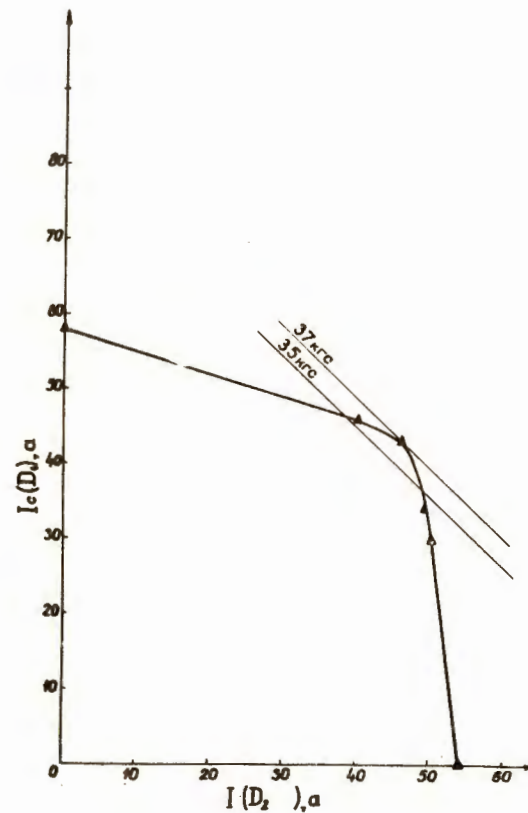


Рис. 3. Зависимость критического тока во внутренней секции соленоида от тока в наружной а)  $I_c(D1) = f[I(D2)]$

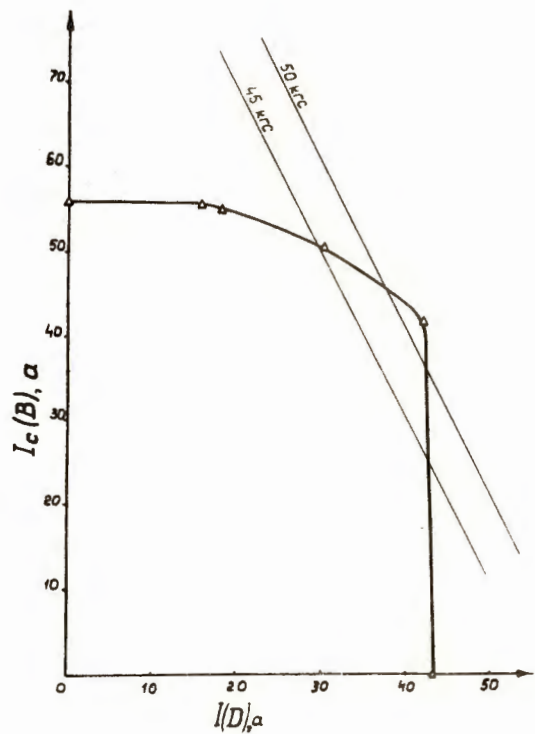


Рис. 3. Зависимость критического тока во внутренней секции соленоида от тока в наружной секции соленоида  $I_c(B) = f[I(D)]$ .

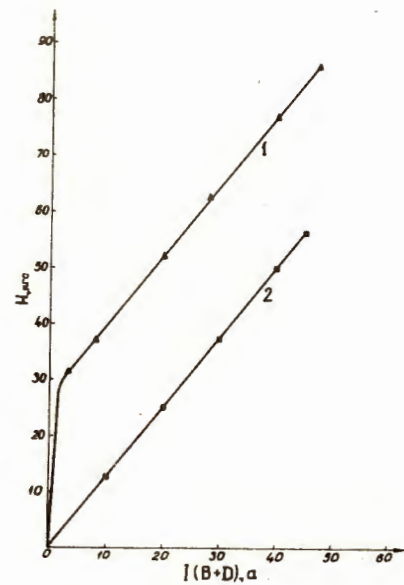


Рис. 4. Зависимости поля в соленоиде (2) и в зазоре между полюсами-вставками (1) от тока в секциях  $D+B$ , включенных последовательно.