

УДК 537.312.62

ФИЗИКА

Академик АН УССР Б. Г. ЛАЗАРЕВ, Л. С. ЛАЗАРЕВА, С. И. ГОРИДОВ

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 1,6 — 5,2° К

В последнее время широкое распространение получили сверхпроводящие лабораторные соленоиды, причем в ряде случаев возникает необходимость использовать соленоиды в широком интервале температур жидкого гелия от 1,5 до 5,2° К. Однако подробных данных о работе соленоидов в этом интервале температур практически нет. Только в работе ⁽¹⁾ приводятся результаты исследования зависимости критического тока от температуры (в интервале 4,2—11° К) соленоида из сплава Nb — 25% Zr с малым полем ~ 20 000 э. На кривой зависимости I_k от T обнаружен максимум при $T \approx 55,^\circ \text{K}$.

В настоящей работе приводятся результаты исследований поведения сверхпроводящих соленоидов с полями до 74 000 э в интервале температур 1,6—5,2° К. Испытывались соленоиды, намотанные проволокой из сплавов Nb — 60 ат. % Ti (60T) и Nb — 25 ат. % Ti — 25 ат. % Zr (СС-2). Проволока с диаметром сердцевинки 0,23 мм покрыта медью толщиной 30—45 м, эмалирована (толщина слоя 15—20 м). Намотка соленоида плотная, между слоями обмотки проложена конденсаторная бумага. Каркас соленоида изготовлен из оргстекла. Толщина центральной трубки каркаса 1—1,5 мм. В щечках каркаса сделаны отверстия. Соленоид помещался в металлический криостат с жидким гелием. При таких условиях различные участки соленоида охлаждаются по-разному. Ближайший к оси слой намотки охлаждается гелием через материал каркаса. Внешние витки соленоида охлаждаются непосредственно жидким гелием. Основная же часть обмотки охлаждается за счет теплопроводности самой обмотки вместе с изоляцией. В табл. 1 приведены некоторые характеристики испытанных в этой работе соленоидов.

Необходимая температура в гелиевой ванне получалась либо откачкой (ниже 4,2° К), либо повышением давления (выше 4,2° К) и поддерживалась с помощью автоматического регулятора давления с погрешностью не более 0,05°. Дополнительно температура контролировалась угольными термометрами, помещенными на различных уровнях обмотки соленоида.

Скорость заведения тока в соленоид dI/dt составляла 10—15 а в мин, а при подходе к критическому значению ~ 2 а в мин. Уменьшение этих скоростей в несколько раз не влияет на величину критического тока.

Таблица 1

№№ соленоидов	Марка проволоки	d_1 , мм	d_2 , мм	l , мм	N	C , э/а	Предельное поле соленоида, э	Примечание
561	60 T	14	59	50	8858	1875	74 000	Меднение металлургическое
260	60 T	13	51	50	6560	1437	43 000	Меднение электролитическое
563	СС-2	14	62,6	50	8600	1784	62 000	То же
160	СС-2	13	54,6	50	9755	1975	34 000	Не медненная

Здесь d_1 — внутренний диаметр намотки; d_2 — внешний диаметр намотки, l — длина намотки, N — число витков, C — постоянная соленоида, H/l .

Для выяснения влияния условий охлаждения обмотки соленоида на величину I_k при температурах ниже 4,2° К измерения проводились как в условиях равновесного кипения гелия, так и в условиях его переохлаждения. Переохлаждение создавалось путем быстрого (за 5—10 сек.) напуска в криостат газообразного гелия при атмосферном давлении; при этом в области He-I температура, установленная перед этим откачкой, сохранялась в течение достаточно долгого времени. Естественно, в области He-II переохлаждение быстро сжимается и поэтому температуры точек на кривой ниже 2,2° К занижены, причем тем больше, чем ниже температура (эти участки на кривых нанесены пунктиром).

Измерения, проведенные в этих условиях на соленоидах из проволоки двух типов сплавов с медным покрытием различной технологии его нанесения (и качества) и без покрытия, показали совершенно различные зависимости, подчас неожиданные, критических токов соленоидов от температуры.

На рис. 1А приведены результаты измерений зависимости критического тока I_k от температуры T для соленоида № 561.

Величина I_k монотонно возрастает при понижении температуры; при температуре вблизи λ -точки I_k резко увеличивается. Обращает внимание, что кривая $I_k(T)$, снятая в переохлажденном гелии, идет ниже кривой, снятой в кипящем гелии при равновесном давлении.

Рис. 1Б относится к соленоиду № 260. В этом случае ход зависимости $I_k(T)$ немонотонный, имеются максимумы при $T = 2,7$ и 2,4° К в равновесных условиях и в переохлажденном гелии соответственно; в λ -точке наблюдается особенность. Заштрихованные области дают величину разброса значений I_k .

Сравнение рис. 1А и 1Б говорит в пользу металлургического меднения: у соленоидов из этой проволоки токи больше и работа соленоидов более стабильна.

На рис. 1В и Г приведены данные измерений соленоидов из проволоки СС-2.

Как видно из рис. 1В, и в условиях равновесного давления гелия, и в условиях переохлажденного гелия наблюдается большой разброс значений I_k (заштрихованные участки) для соленоида № 563.

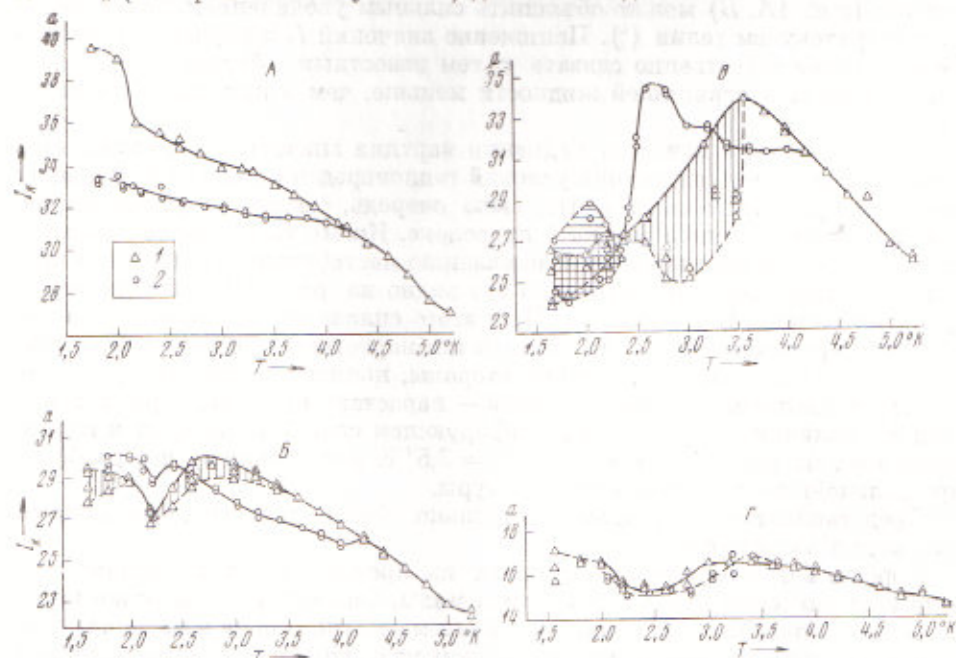


Рис. 1. Зависимость критического тока от температуры для соленоидов №№ 561 (А), 260 (Б), 563 (В), 160 (Г), если 1 — P_{He} равновесное, 2 — $P_{\text{He}} = 760$ мм рт. ст.

Обращает на себя внимание, что в то время, как у соленоида из сплава 60Т с металлургическим меднением (рис. 1А) с понижением температуры от 4,2 до 2° К ток монотонно возрастает ~ на 25%, у соленоида из тройного сплава понижение температуры отнюдь не ведет к повышению тока. Сходным образом ведет себя соленоид из немедленной проволоки тройного сплава (рис. 1Г). Из этого рисунка видно, что на величине I_k мало сказываются условия охлаждения.

Результаты измерений показали, что возрастание температуры от 4,2 до 5,2° К у всех соленоидов сравнительно мало (~ на 15%) понижает I_k при хорошей стабильной работе соленоида.

То, что величина критического тока соленоида зависит не только от температуры, но и от состояния жидкого гелия — кипящий или переохлажденный, He-I или He-II (рис. 1А — В), свидетельствует, что в соленоиде происходит тепловыделение и большую роль играют условия теплопередачи между сверхпроводящей проволокой и гелиевой ванной.

Тепловыделение может происходить при возникновении токов Фуко в медной оболочке как из-за изменения магнитного потока при заведении тока в соленоид, так и из-за скачкообразного проникновения потока в сверхпроводник (², ³).

Так как величина I_k не зависит от скорости заведения тока, то основной причиной, ограничивающей I_k , являются скачки потока, которые, в свою очередь, являются основной причиной тепловыделения. При этом практически все тепловыделение локализовано в медном покрытии (сопротивление его при температуре жидкого гелия в 10^3 — 10^4 раз меньше сопротивления сверхпроводящего материала в нормальном состоянии). Это подтверждается отсутствием различия в ходе I_k немедленной проволоки в кипящем и в переохлажденном гелии (рис. 1Г).

Наибольшая величина магнитного поля действует на ближайший к оси соленоида слой обмотки; по-видимому, поведение $I_k(T)$ соленоида определяется условиями теплопередачи именно для этого слоя проволоки. Отвод тепла в гелий от проволоки при этом осуществляется через слой эмали и оргстекло.

Резкое возрастание значений I_k при понижении температуры ниже λ -точки (рис. 1А, В) можно объяснить сильным увеличением теплопередачи в сверхтекучем гелии (⁴). Понижение значений I_k в случае переохлажденного гелия естественно связать с тем известным обстоятельством, что теплопередача в некипящей жидкости меньше, чем в кипящей. Это видно на рис. 1А.

При ухудшении качества меднения картина значительно усложняется (рис. 1Б) как из-за изменения условий теплопередачи, так и из-за меньших значений критического тока, что, свою очередь, связано с уменьшением демпфирования скачков потока в проволоке. Кроме того, плохое покрытие приводит по тем же причинам к появлению нестабильности значений критического тока. Особенно наглядно это видно на рис. 1В, относящемся к тройному сплаву. Как известно (²), у этого сплава сильно развито скачкообразное проникновение поля. Эти скачки нарастают при понижении температуры. Таким образом, с одной стороны, понижение температуры способствует увеличению тока, с другой, — нарастает причина, ограничивающая его величину при плохом демпфирующем слое. Это приводит к максимуму тока на рис. 1В и Г вблизи $T = 3,5^\circ \text{К}$ и к большому его разбросу при дальнейшем понижении температуры.

Представляется необходимым отдельно, более детально, рассмотреть роль медного покрытия.

Хорошо известно, что в соленоидах из проволоки без металлического покрытия значения критического тока малы. Они ограничены резко выраженным скачкообразным проникновением магнитного поля в материал проволоки, которое не локализуется в малом участке отдельной проволоки, а захватывает целые области обмотки. Покрытие с хорошими проводящими

свойствами в этом случае является электромагнитным экраном, очень сильно растягивающим скачок по времени и ограничивающим область его распространения. Это приводит к реализации все более высоких критических токов. Предельным случаем является так называемая полная стабилизация⁽⁵⁾, достигаемая очень толстым металлическим слоем.

В лабораторных соленоидах из-за необходимости сохранять их малые размеры используется сверхпроводящая проволока с тонким металлическим покрытием (15—40 м). Уже такое покрытие обеспечивает высокие критические токи и стабильность работы соленоидов. Однако, как показывают данные рис. 1А—В, очень важную роль играет высокое качество покрытия, как по электропроводности, так и по степени прилегания. Наилучшим образом это реализуется на проволоке, полученной волочением сверхпроводника вместе с оболочкой из достаточно чистой меди. Полученные результаты показывают, что вредное действие тепловыделения в оболочке полностью перекрывается улучшающимися свойствами хорошо электро- и теплопроводящего покрытия.

Таким образом, проведенные исследования показали, что сверхпроводящие соленоиды с большими полями могут успешно работать в области температур как ниже 4,2° К, так и выше, по крайней мере, вплоть до критической температуры гелия 5,2° К.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность В. А. Полтавцу и Г. А. Черкашину за разработку конструкции криостата и регулятора давления.

Физико-технический институт
Академии наук УССР
Харьков

Поступило
3 V 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Корниш, Уильямс, Сверхпроводящие соленоиды, 1965, стр. 229. ² Б. Г. Лазарев, О. Н. Овчаренко, ДАН, 189, № 6, 58 (1969). ³ N. H. Zeboouni, A. Venkataram et al., Phys. Rev. Letters, 13, № 21, 606 (1964). ⁴ В. Кеаом, Гелий, ИЛ, 1949, стр. 334. ⁵ A. R. Kontrovitz, Z. J. J. Stekly, Appl. Phys. Letters, 6, 56 (1965).