

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБЪЕКТОВ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ**

*Александр Федорович Бродников*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ), г. Новосибирск, Россия, научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, тел. (383)329-45-82, e-mail: A.F.Brodnikov@inp.nsk.su

Рассмотрены метод и измерительная установка для определения действительный значений критического тока в сверхпроводниках, при гелиевых температурах, поступающих на рынок от отечественных и зарубежных производителей композиционной проволоки, круглого или прямоугольного сечения, на основе сплава Nb-Ti.

**Ключевые слова:** измерительная установка; сверхпроводящий провод; криогенная температура; критический ток.

## **MEASURING INSTALLATION FOR DETERMINING CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF COMPOSITE SUPERCONDUCTORS IN THE PRODUCTION OF CRYOGENIC TECHNIQUE**

*Alexander F. Brodnikov*

Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090 Russian Federation, 11, Acad. Lavrentieva Pr., Novosibirsk, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (383)329-45-82, e-mail: A.F.Brodnikov@inp.nsk.su

The method and measuring installation for determining the actual critical current values in superconductors, at helium temperatures, coming to the market from domestic and foreign manufacturers of composite wire, round or rectangular section, based on the Nb-Ti alloy, are considered.

**Key words:** measuring installation; superconducting wire; cryogenic temperature; critical current.

Приступая к проектированию сверхпроводящих магнитов и других объектов криогенной техники особую роль уделяют характеристикам указанными производителями сверхпроводящих проводов. В связи с этим в ИЯФ было принято решение о создании измерительной установки, предназначенной для определения действительных значений критического тока в сверхпроводниках, поступающих на рынок от отечественных и зарубежных производителей композиционной проволоки, на основе сплава Nb-Ti. В настоящее время федеральные законы «О техническом регулировании» и «О стандартизации» имеют статус «добровольного применения» [1], поэтому отечественные предприятия, включая зарубежные, поставляющие на рынок различные материалы, не имеют обязательств и возможностей осуществлять выходной контроль по колоссальному числу существующих свойств, да еще и в диапазоне криогенных температур.

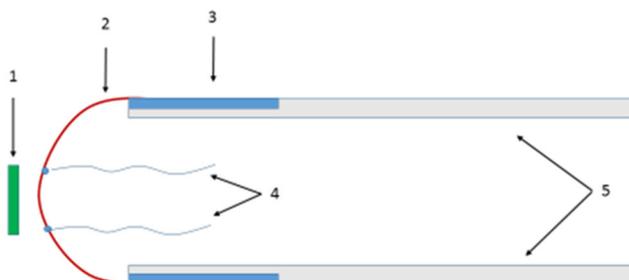
Измерительная установка изготовлена на базе криостата КГ-60/300-1 во внутренней полости которого, в среде жидкого гелия, располагается соленоид,

а в его центральной части располагается вставка-держатель с образцом. Питание соленоида и исследуемого образца, по токовводам расположенными в верхней крышке криостата, осуществляется источниками питания фирмы Danfysik – system 8800 при помощи ПК и управляющей программы, разработанной в ИЯФ. Внешний вид криостата и соленоида представлен на рис. 1.



Рис. 1. Соленоид и криостат КГ-60/300-1

Для опробования установки по определению вольтамперных характеристик (ВАХ) в сверхпроводниках при гелиевых температурах, были проведены испытательные измерения по методике МВИс 400-423/8-2018 разработанной АО «ВНИИНМ» [2]. Измерения проводили на образцах композиционной проволоки, на основе сплава Nb-Ti, длиной равной 0,08 м и диаметрами 0,5 и 0,85 мм, отрезанными от проводов штатных партий, при этом ВАХ были указаны производителями данных сверхпроводников. Каждый образец припаивался к оправке из меди сечением 4x2 мм индий-оловянным низкотемпературным припоем (рис. 2). Оправка с образцом монтируется к токовводам криостата. В центре измеряемого провода припаивали потенциальные провода на расстоянии 1 см между собой, которые подключаются к универсальному прецизионному измерителю В7-99. Весь процесс измерений регистрируется при помощи программного обеспечения, поставляемого с измерителем.



1 – датчик Холла; 2 – исследуемый сверхпроводник; 3 – место пайки сверхпроводника; 4 – потенциальные провода; 5 – оправка из меди сечением 4x2 мм

Рис. 2. Образец провода на оправке

Все технологические канавки заливаются высокотемпературным силиконовым герметик-прокладкой. После окончательной сборки вставки-держателя в его центральной части устанавливается датчик Холла, для измерения магнитного поля, производства компании «Lake Shore Cryotronics Inc.» (Sensor Model: HGCT-3020, Mean Loaded Sensitivity: 0,773mV/kG) непосредственно вблизи с измеряемым сверхпроводником (рис. 3). Перед проведением испытаний все средства измерений данной установки, должны быть откалиброваны.

После проведения всех организационных операций при заливке в криостат жидкого гелия, осуществляя контроль уровня газа в криостате и его температуры  $4,2 \pm 1$  К (датчиками температуры DT-670 Silicon Diodes, компании Lake Shore Cryotronics Inc.), а также температуры токовводов. Далее поднимаем магнитное поле в соленоиде до уровня 7 Тл согласно показаниям датчика Холла ( $54,11 \pm 0,01$  mV), в качестве опорной точки указанной производителем сверхпроводника.

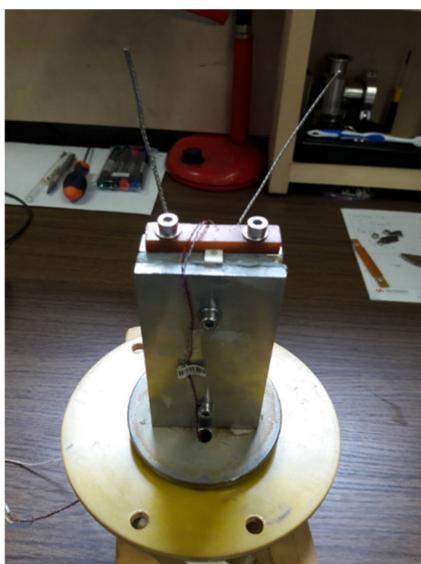


Рис.3. Вставка-держатель

Запись ВАХ в образцах проводится при увеличении силы тока со скоростью до 0,1 А/с вплоть до появления величины напряженности электрического поля  $E$  равной 0,8 – 1,0 мкВ/см [3]. За критический ток ( $I_c$ ) принимается значения тока, соответствующее электрическому полю в образце 0,8 – 1,0 мкВ/см, как наклон графика  $\log E - \log I$  в указанном диапазоне электрических полей. Результат измерения критического тока в проводнике в зависимости от индукции магнитного поля представлен на графике ВАХ образца диаметром 0,5 мм при 7 Тл на рис. 4.

Расчетное значение критического тока, указанного изготовителем измеряемых сверхпроводящих проводов при 7 Тл должно составлять 200 А и 372 А. Полученное нами значение составило 212 А и 382 А, что составляет менее 10% [4] и это соответствует пределу допускаемой основной абсолютной погрешности измерителя В7-99 которая составляет  $\pm (1,5 \cdot 10^{-3} + 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot |U|)$  мВ ( $U$  - измеренное напряжение, мВ). Как видно работоспособность измерительной установки для

определения действительных значений критического тока подтверждена, а получение более точного результата измерений позволит современная прецизионная цифровая измерительная аппаратура, с допускаемой основной абсолютной погрешностью  $\pm 0,0025\% + 0,02$  нВ.

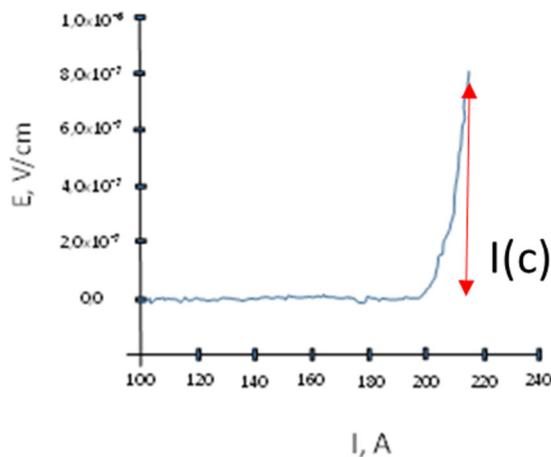


Рис. 4. ВАХ образца провода в поле 6,94 Тл

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбак Н.И., Черепанов В.Я., Шейнин Э.М., Ямшанов В.А. Правовой статус национальных стандартов единства измерений // Стандарты и качество. — 2015. — № 12. С. 44–47.
2. МВИс 400-423/8-2018 – Методика измерения критического тока и определения показателей кривизны вольтамперной характеристики сверхпроводящих проводов на основе сплава Nb-Ti – АО «ВНИИНМ» -2018 г.
3. Н.В. Быковский, В.С. Высоцкий, А.А. Носов, С.С. Фетисов – Установка для исследования температурной зависимости критического тока сверхпроводников на основе дигборида магния // Кабели и Провода. – 2016 – №5. С. 20 – 25.
4. Сотников Д. В., – Исследование токонесущих свойств перспективных высокотемпературных сверхпроводящих материалов для электротехнических устройств – ОАО «Всероссийский Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Кабельной Промышленности» - 2016 г.

© А. Ф. Бродников, 2020