

УДК 53.082.78

© Д. С. Чикуров, А. Е. Рудоминский, М. П. Волков, 2024

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ЛЕНТЫ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА ОТ ВЕЛИЧИНЫ И ОРИЕНТАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрена методика бесконтактного определения критического тока J_c ленты из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), использующая эффект захвата магнитного потока в сверхпроводящем кольце. Показано, что приложение локального магнитного поля на участке ленты позволяет определить зависимость J_c от величины магнитного поля H и угла α между плоскостью ленты и направлением магнитного поля. Измерения $J_c(H, \alpha)$, проведенные на экспериментальной установке, использующей предложенную методику, показали хорошее согласие результатов с опубликованными данными по анизотропии критических токов ВТСП-лент.

Кл. сл.: лента ВТСП, критический ток, бесконтактный метод измерения, анизотропия, зависимость от магнитного поля, захваченный магнитный поток

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области получения сверхпроводящих проводов второго поколения (ВТСП-лент) с высокими значениями критического тока при температуре жидкого азота позволяет перейти к созданию магнитных систем различного назначения [1]. В таких магнитных системах токонесящая ВТСП-лента в разных областях намотки будет находиться под действием магнитного поля разной величины и ориентации относительно плоскости ленты. Поэтому при проектировании и создании магнитных систем ВТСП требуется учитывать зависимость критического тока ВТСП-ленты от величины и ориентации магнитного поля [2].

Измерение зависимостей критического тока от величины и ориентации магнитного поля $J_c(H)$ обычно производится 4-зондовым резистивным методом. Из-за большой величины критических токов ВТСП-лент использование этого метода требует создания надежных электрических контактов, использования мощного источника тока и защиты сверхпроводника от деградации при резком переходе в нормальное состояние. Избежать сложностей, связанных с резистивным методом, позволяют бесконтактные методы измерения J_c , основанные на особенностях магнитных свойств сверхпроводящего состояния. Производители ВТСП-лент для контроля величины и однородности J_c ленты используют бесконтактный метод, при котором к участку ленты прикладывается

магнитное поле небольшой величины (~ 1 кЭ), в ленте возникают экранирующие токи, и распределение поля этих токов измеряется массивом датчиков Холла. Измеренное распределение поля пересчитывается с использованием модели критического состояния в величину критического тока ленты. Данный метод позволяет определять однородность критического тока по длине ленты и реализован, например, в установке TapeStar компании Theva. Этот метод удобен для производителей ленты, так как позволяет получать данные об однородности критического тока по всей длине ленты, но является достаточно сложным и требует дорогого оборудования. При использовании ВТСП-лент для создания магнитных систем желательно проводить входной контроль параметров лент более простым методом. Использование резистивного метода, как уже упоминалось выше, имеет свои ограничения. Удобным бесконтактным способом измерения J_c является метод, основанный на захвате магнитного потока в сверхпроводящих кольцах [3].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для создания кольца из ВТСП-ленты можно использовать следующий способ: по середине ширины ленты делается продольный разрез, не достигающий до краев отрезка ленты, в полученный разрез вставляется диэлектрическое кольцо — фиксатор.

И таким образом получается сплошное сверхпроводящее кольцо, образованное лентой шириной в половину ширины исходной ленты [4]. Полученные таким образом ВТСП-кольца широко используются в экспериментальной практике для создания магнитных систем захваченного потока [5], магнитных подшипников [6] и для измерения величины и темпа релаксации критического тока [7].

Для измерения критического тока через площадь сверхпроводящего кольца создается магнитный поток, при этом в кольце возбуждается экранирующий ток, величина которого ограничена критическим током ленты. Магнитное поле в центре кольца, созданное как внешним источником, так и током кольца, измеряется датчиком Холла, и можно определить предельную величину магнитного поля, после которого вклад поля тока кольца остается постоянным, что соответствует J_c ВТСП-ленты. Максимальное поле тока кольца позволяет вычислить J_c кольца, пользуясь простой формулой поля в центре витка с током. Критический ток ВТСП-ленты можно также определить по максимальному захваченному потоку в кольце после выключения внешнего поля. Магнитный поток внутри кольца может быть создан как внешним соленоидом, так и соленоидом, введенным в полость кольца. Второй метод является более предпочтительным, т.к. позволяет определить критический ток в нулевом поле [8].

В ВТСП-лентах критический ток уменьшается при приложении внешнего магнитного поля, и если к участку кольца приложить локально магнитное поле, то критический ток кольца будет определяться именно пониженным значением критического тока этого участка. Исходя из этого, нами была предложена конструкция устройства для измерения зависимостей критического тока от величины и ориентации магнитного поля, в котором магнитное поле прикладывается локально с помощью системы постоянных магнитов (см. рис. 1 и Приложение, рис. П). Сильные постоянные магниты из сплава NdFeB были закреплены на держателе, позволяющем плавно сближать магниты до расстояния, равного ширине ленты, при этом приложенное поле меняется от нуля до 1.5 кЭ. Дополнительно в предложенном устройстве имеется возможность плавного изменения ориентации приложенного поля от направления, перпендикулярного плоскости ленты, до параллельной плоскости с шагом 4.5° . Стоит отметить, что стержни управления величиной и ориентацией локального магнитного поля выведены из криогенной области, что позволяет менять эти параметры, не прерывая эксперимент. В полость кольца введен соленоид для создания магнитного потока, а в центре кольца размещен датчик Холла, измеряющий нормальную к плоскости кольца компоненту магнитного поля H .

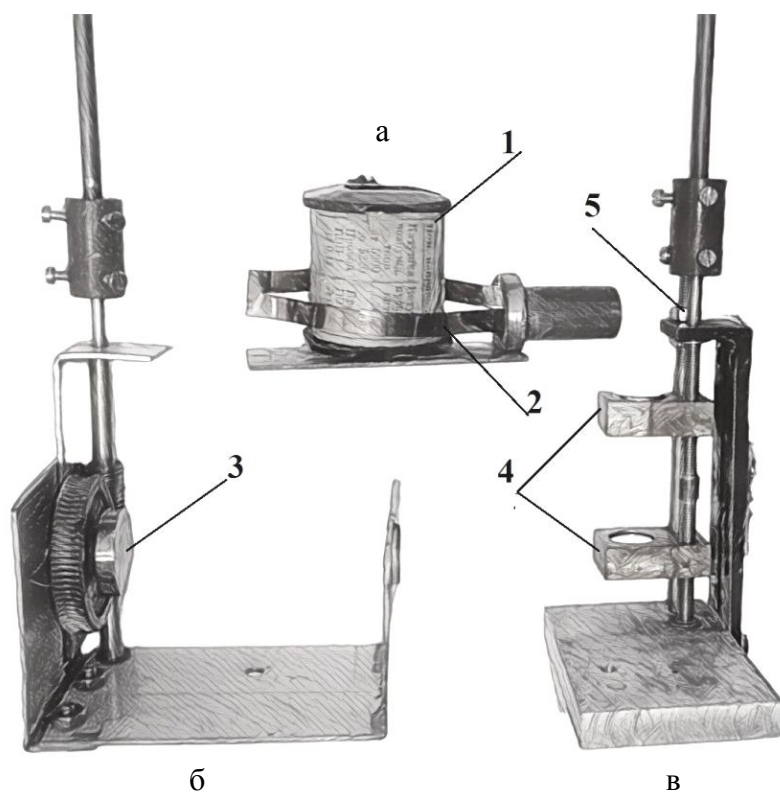


Рис. 1. Устройство для бесконтактных измерений зависимостей критического тока ВТСП-ленты от величины и ориентации магнитного поля.

Приведены три составных части устройства.

а — соленоид (1) с ВТСП-лентой (2) и датчиком Холла в центре соленоида (может использоваться отдельно для определения $J_c(H=0)$).

Дополнительные элементы: б — механизм изменения ориентации (3) ленты относительно поля постоянных магнитов (4), расположенных на механизме изменения локального поля (5) — в

Центральная часть устройства (см. рис 1, а) была использована в предварительных экспериментах для измерения критического тока ВТСП-ленты SuperOx (Москва) шириной 4 мм, и было получено хорошее соответствие измеренного критического тока при $T = 77$ К и $H = 0$ с величиной, заявленной производителем [9].

Измерения проводились при температуре жидкого азота 77 К. Процедура измерения состояла в следующем: предварительной градуировке соленоида (измерение H в центре соленоида от тока соленоида) и последующем измерении поля H в центре соленоида при наличии ВТСП-кольца. Разность этих двух величин соответствует полю, созданному током кольца. Поскольку поле H_{sol} в центре соленоида много больше, чем поле кольца H_r , то разность $(H_{sol} + H_r) - H_{sol}$ определяется с невысокой точностью. С большей точностью значение критического тока кольца может быть получено при измерении поля, созданного замороженным в кольце током после уменьшения приложенного H_{sol} до нуля. В этом случае датчик Холла измеряет только поле тока кольца, которое можно вычислить по формуле магнитного поля в центре кругового витка с током $H = J / 2R$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2, а, для примера представлена полная петля зависимости $J/J_c(H_{sol})$ полученного таким образом тока кольца (приведенного к максимальному значению) от величины предварительно приложенного поля соленоида в нулевом внешнем магнитном поле. Отметим, что замороженный в кольце ток начинает отклоняться от нуля при значении $H_{sol} \sim 250$ Э, а выходит на насыщение при вдвое большем значении $H_{sol} \sim 500$ Э, что и следует ожидать при рассмотрении процесса захвата потока в кольце [8]. На рис. 2, б, приведен начальный участок аналогичной зависимости, полученной при значении локального поля $H_{loc} = 1200$ Э, направленного нормально плоскости ленты. Видно, что в этом случае захват потока (достижение J_c) начинается при меньшем значении $H_{sol} \sim 200$ Э и выходит на насыщение при $H_{sol} \sim 400$ Э, что свидетельствует об уменьшении J_c ленты при увеличении магнитного поля.

С использованием созданного устройства были проведены измерения анизотропии J_c ВТСП-ленты в интервале углов от -90° до 90° с шагом 5° для ряда локально приложенных магнитных полей с максимальным значением $H_{loc} = 1500$ Э.

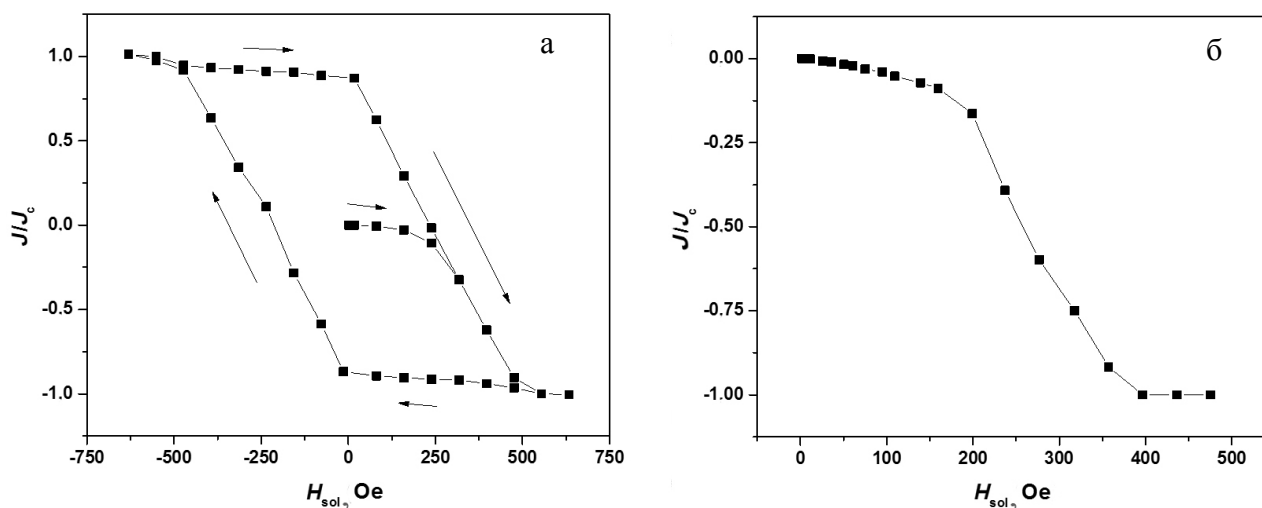


Рис. 2. Зависимости токов кольца из ВТСП-ленты, создающих захваченный поток в кольце после уменьшения магнитного поля соленоида от величины H_{sol} до нуля.

Зависимости нормированы на максимальное значение тока кольца, которое принимается за критический ток J_c . а — полная петля $J/J_c(H_{sol})$ в нулевом внешнем магнитном поле; б — начальный участок зависимости $J/J_c(H_{sol})$ при наличии локального магнитного поля $H_{loc} = 1200$ Э, приложенного под углом 90° к поверхности ленты

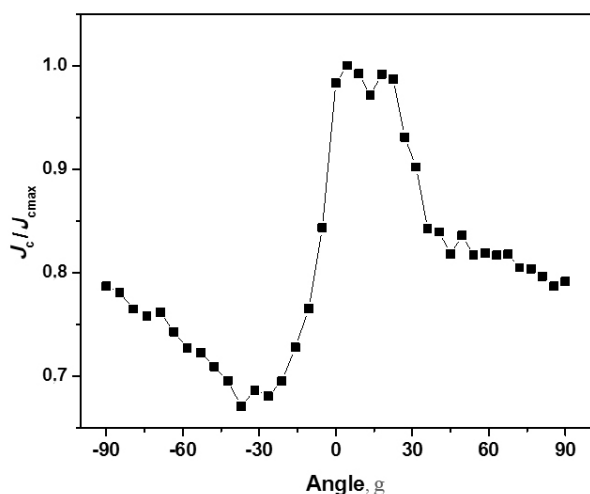


Рис. 3. Зависимость критического тока ленты, нормированного на максимальный критический ток, от угла приложения локального магнитного поля $H_{loc} = 1000$ Э. Нулевой угол соответствует ориентации магнитного поля параллельно плоскости ленты

На рис. 3 для примера приведена одна из экспериментальных зависимостей $J_c/J_{cmax}(\alpha)$, полученная при $H_{loc} = 1000$ Э и $T = 77$ К. Обращает на себя внимание ряд особенностей этой зависимости: во-первых, немонотонная зависимость $J_c/J_{cmax}(\alpha)$, во-вторых, смещение пика J_c на 20° от направления, параллельного плоскости ленты, в-третьих, асимметрия зависимости $J_c/J_{cmax}(\alpha)$ относительно $\alpha = 0^\circ$. В работе [10] сообщалось об измерениях анизотропии критического тока ленты того же состава и так же указывалось на резкое уменьшение критического тока при отклонении от $\alpha = 0^\circ$ и на асимметрию зависимости $J_c(\alpha)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модификация метода определения критического тока по захваченному в кольцо магнитному потоку. Модифицированный метод позволяет измерять зависимость критического тока от величины и ориентации магнитного поля, используя пару постоянных магнитов, создающих локальное магнитное поле на участке ВТСП-ленты. Было реализовано устройство, в основе которого лежит данный метод, и получены зависимости намагниченности от магнитного потока соленоида и критического тока от угла приложения

локального магнитного поля для колец из ВТСП-ленты фирмы SuperOx. На зависимости намагниченности от магнитного поля соленоида при нулевом внешнем магнитном поле видно, что замороженный в кольце ток начинает отклоняться от нуля при значении $H_{sol} \sim 250$ Э, а выходит на насыщение при вдвое большем значении $H_{sol} \sim 500$ Э. Двукратное отношение поля насыщения к полю начала роста тока сохраняется и при приложении локального магнитного поля.

Были получены зависимости анизотропии критического тока для данной ленты. Зависимости демонстрируют существенную асимметрию относительно параллельного ($\alpha = 0^\circ$) магнитного поля и смещение пика критического тока на 20° .

Полученный массив данных показывает эффективность модификации метода определения критического тока по захвату в сверхпроводящем кольце магнитного потока. Показано, что предложенный метод может быть использован для измерения и контроля характеристик ВТСП-лент при проектировании и создании магнитных систем с их использованием.

ПРИЛОЖЕНИЕ

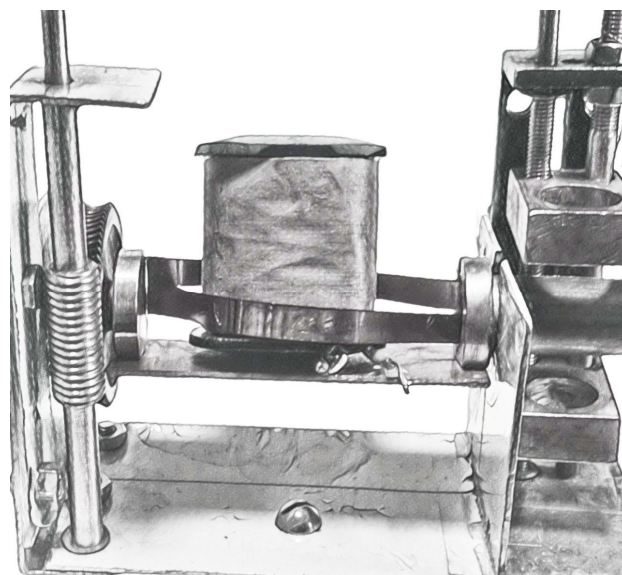


Рис. П. Устройство (в сборе) для бесконтактных измерений зависимостей критического тока ВТСП-ленты от величины и ориентации магнитного поля

Благодарности

Авторы благодарят фирму SuperOx (Москва) за предоставление образцов ВТСП-лент.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00390, <https://rscf.ru/project/23-29-00390>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shchukin A.E., Kaul' A.R. Approaches to Increasing the Current-Carrying Characteristics in Second-Generation HTSC Tapes // *Inorganic Materials*. 2022. Vol. 58. P. 1365–1397. DOI: 10.1134/S0020168522130015
2. Zhang Z., Zhou B., Liu J. et al. Engineering-based design and fabrication procedure for mid-temperature REBCO magnets accommodating the strong I_c anisotropy // *Superconductivity*. 2022. Vol. 1. Id. 100005. DOI: 10.1016/j.supcon.2022.100005
3. Zheng H., Claus H., Chen L. et al. Transport currents measured in ring samples: test of superconducting weld // *Physica C: Superconductivity*. 2001. Vol. 350, iss. 1-2. P. 17–23. DOI: 10.1016/S0921-4534(00)01566-5
4. Levin G.A., Barnes P.N., Murphy J. et al. Persistent current in coils made out of second generation high temperature superconductor wire // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93, iss. 6. Id. 062504. DOI: 10.1063/1.2969798
5. Sheng J., Zhang M., Wang Y. et al. A new ring-shape high-temperature superconducting trapped-field magnet // *Superconductor Science and Technology*. 2017. Vol. 30, no. 9. Id. 094002. DOI: 10.1088/1361-6668/aa7a51
6. Santos da Cruz V., Telles G.T., Ferreira A.C. et al. Pulse Magnetization of Jointless Superconducting Loops for Magnetic Bearings Height Control // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018. Vol. 28, no. 4. P. 1–4. Id. 3601204. DOI: 10.1109/TASC.2018.2816105
7. Rong C.C., Barnes P.N., Levin G.A. et al. Investigation of the Relaxation of Persistent Current in Superconducting Closed Loops Made Out of YBCO Coated Conductors // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2015. Vol. 25, no. 3. P. 1–5. Id. 8200805. DOI: 10.1109/TASC.2014.2376173
8. Шелых А.И., Кудинов Е.К. Возбуждение незатухающего тока в ВТСП кольце // *Физика твердого тела*. 1994. Т. 36, вып. 9. С. 2585–2589. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/16630>
9. Chikurov D.S., Volkov M.P. Study of the anisotropy of critical currents in 2G-HTSC tapes by a non-contact method // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal - Physics and Mathematics*. 2023. Vol. 16, no. 1.1. P. 142–145. DOI: 10.18721/JPM.161.124
10. Molodyk A., Samoilencov S., Markelov A. et al. Development and large volume production of extremely high current density $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting wires for fusion // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Id. 2084. DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
РАН, Санкт-Петербург**

Контакты: Рудоминский Александр Евгеньевич,
a.rudominskiy@mail.ioffe.ru

Материал поступил в редакцию 03.12.2023

NON-CONTACT METHOD FOR MEASURING THE DEPENDENCE OF THE CRITICAL CURRENT OF A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR TAPE ON THE MAGNITUDE AND ORIENTATION OF THE MAGNETIC FIELD

D. S. Chikurov, A. E. Rudominskiy, M. P. Volkov

Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, Saint Petersburg, RF

A method for non-contact measurement of the critical current J_c of a high-temperature superconductor (HTSC) tape is considered, using the effect of magnetic flux capture in a superconducting ring. It is shown that the application of a local magnetic field on a section of the tape makes it possible to determine the dependence of J_c on the magnitude of the magnetic field H and the angle α between the plane of the tape and the direction of the magnetic field. Measurements of $J_c(H, \alpha)$ carried out on an experimental setup using the proposed technique showed good agreement of the results with published data on the anisotropy of the critical currents of HTSC tapes.

Keywords: HTSC tape, critical current, non-contact measurement method, anisotropy, magnetic field dependence, trapped magnetic flux

REFERENCES

1. Shchukin A.E., Kaul' A.R. Approaches to Increasing the Current-Carrying Characteristics in Second-Generation HTSC Tapes. *Inorganic Materials*, 2022, vol. 58, pp. 1365–1397. DOI: 10.1134/S0020168522130015
2. Zhang Z., Zhou B., Liu J. et al. Engineering-based design and fabrication procedure for mid-temperature REBCO magnets accommodating the strong I_c anisotropy. *Superconductivity*, 2022, vol. 1, id. 100005. DOI: 10.1016/j.supcon.2022.100005
3. Zheng H., Claus H., Chen L. et al. Transport currents measured in ring samples: test of superconducting weld. *Physica C: Superconductivity*, 2001, vol. 350, iss. 1-2, pp. 17–23. DOI: 10.1016/S0921-4534(00)01566-5
4. Levin G.A., Barnes P.N., Murphy J. et al. Persistent current in coils made out of second generation high temperature superconductor wire. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, iss. 6, id. 062504. DOI: 10.1063/1.2969798
5. Sheng J., Zhang M., Wang Y. et al. A new ring-shape high-temperature superconducting trapped-field magnet. *Superconductor Science and Technology*, 2017, vol. 30, no. 9, id. 094002. DOI: 10.1088/1361-6668/aa7a51
6. Santos da Cruz V., Telles G.T., Ferreira A.C. et al. Pulse Magnetization of Jointless Superconducting Loops for Magnetic Bearings Height Control. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 1–4, id. 3601204. DOI: 10.1109/TASC.2018.2816105
7. Rong C.C., Barnes P.N., Levin G.A. et al. Investigation of the Relaxation of Persistent Current in Superconducting Closed Loops Made Out of YBCO Coated Conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 1–5, id. 8200805. DOI: 10.1109/TASC.2014.2376173
8. Shelych A.I., Kudinov E.K. [Excitation of non-extinguishing current in HTSC ring]. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], 1994, vol. 36, iss. 9, pp. 2585–2589. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/16630> (In Russ.).
9. Chikurov D.S., Volkov M.P. Study of the anisotropy of critical currents in 2G-HTSC tapes by a non-contact method. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal - Physics and Mathematics*, 2023, vol. 16, no. 1.1, pp. 142–145. DOI: 10.18721/JPM.161.124
10. Molodyk A., Samoilentov S., Markelov A. et al. Development and large volume production of extremely high current density $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting wires for fusion. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, id. 2084. DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z

Contacts: Rudominskiy Alexander Evgenievich,
a.rudominskiy@mail.ioffe.ru

Article received by the editorial office on 03.12.2023

INTRODUCTION

Progress in the field of obtaining second-generation superconducting wires (HTS tapes) with high critical current values at liquid nitrogen temperature allows you to go to the creation of magnetic systems for various purposes [1]. In such magnetic systems, the current-carrying HTS tape in different winding areas is under the influence of a magnetic field of different magnitudes and orientations relative to the plane of the tape. Therefore, when designing and creating HTS magnetic systems, it is necessary to take into account the dependence of the critical current of the HTS tape on the magnitude and orientation of the magnetic field [2].

Measuring critical current dependencies on the magnitude and orientation of the magnetic field $J_c(\mathbf{H})$ is usually carried out using the 4-probe resistive method. Due to the large critical currents of HTS tapes, the use of this method requires the creation of reliable electrical contacts, the use of a powerful current source, and protecting the superconductor from degradation during a sudden transition to the normal state. Non-contact methods for measuring J_c , based on the peculiarities of the magnetic properties of the superconducting state, allow one to avoid the difficulties associated with the resistive method. Manufacturers of HTS tapes use a non-contact method to control the size and uniformity of the J_c tape, in which a small magnetic field (~ 1 kOe) is applied to a section of the tape, image current arises in the tape, and the field distribution of these currents is measured by an array of Hall sensors. The measured field distribution is recalculated using the critical state model into the value of the tape critical current. This method makes it possible to determine the uniformity of the critical current along the length of the tape and is implemented, for example, in the THEVA TapeStar installation. This method is convenient for tape manufacturers since it allows one to obtain data on the uniformity of the critical current along the entire length of the tape, but it is quite complex and requires expensive equipment. When using HTS tapes to create magnetic systems, it is desirable to carry out input control of the tape parameters using a simpler method. The use of the resistive method, as mentioned above, has its limitations. A convenient non-contact way to measure J_c is a method based on magnetic flux capture in superconducting rings [3].

EXPERIMENT

To create a ring from HTS tape, you can use the following method: a longitudinal cut is made in the middle of the width of the tape, not reaching the edges of the tape segment, and a dielectric ring is inserted into the resulting cut — a retainer. And thus, a conti-

nuous superconducting ring is obtained, formed by a tape half the width of the original tape [4]. The HTS rings obtained in this way are widely used in experimental practice to create magnetic systems of trapped flux [5], magnetic bearings [6], and to measure the magnitude and rate of relaxation of the critical current [7].

To measure the critical current, a magnetic flux is created through the area of the superconducting ring, and a screening current is excited in the ring, the value of the current is limited by the critical current of the tape. The magnetic field at the center of the ring, created both by an external source and by the ring current, is measured by a Hall sensor. It is possible to determine the limiting value of the magnetic field, after which the contribution of the ring current field remains constant, which corresponds to J_c of the HTS tape. The maximum field of the ring current allows us to calculate the J_c of the ring using a simple formula for the field at the center of the coil with current.

The critical current of an HTS tape can also be determined based on the maximum trapped flux in the ring after turning off the external field. The magnetic flux inside the ring can be created either by an external solenoid or by a solenoid introduced into the ring cavity. The second method is more preferable because it allows you to determine the critical current in a zero field [8]. In HTS tapes, the critical current decreases when an external magnetic field is applied, and if a magnetic field is applied locally to a section of the ring, then the critical current of the ring will be set precisely by the reduced value of the critical current of this section. Based on this, we proposed the design of a device for measuring the dependence of the critical current on the magnitude and orientation of the magnetic field, in which the magnetic field is applied locally using a system of permanent magnets (see Fig. 1 and Appendix, Fig. II). Strong permanent magnets made of NdFeB alloy were mounted on a holder, allowing the magnets to be smoothly brought together to a distance equal to the width of the tape while the applied field varies from zero to 1.5 kOe. Additionally, the proposed device has the ability to smoothly change the orientation of the applied field from a direction perpendicular to the plane of the tape to a parallel plane with a step of 4.5° . It is worth noting that the control rods for the magnitude and orientation of the local magnetic field are removed from the cryogenic region, which makes it possible to change these parameters without interrupting the experiment. A solenoid is inserted into the ring cavity to create a magnetic flux, and a Hall sensor is placed in the center of the ring, measuring the magnetic field component H normal to the plane of the ring.

The central part of the device (see Fig. 1, a) was used in preliminary experiments to measure the critical current of a 4 mm wide SuperOx HTS tape (Mos-

cow), and good agreement of the measured critical current at $T = 77$ K and $H = 0$ with the value declared by the manufacturer [9] was obtained.

Fig. 1. A device for non-contact measurements of the dependence of the critical current of a HTS tape on the magnitude and orientation of the magnetic field.

Three components of the device are given.

a — solenoid (1) with HTS tape (2) and a Hall sensor in the center of the solenoid (can be used separately to determine $J_c(H = 0)$).

Additional elements: б — mechanism for changing the orientation (3) of the tape relative to the field of permanent magnets (4) located on the mechanism for changing the local field (5) — B

The measurements were carried out at a liquid nitrogen temperature of 77 K. The measurement procedure was as follows: preliminary calibration of the solenoid (measurement of H from the solenoid current in the center of the solenoid) and subsequent measurement of the field H in the center of the solenoid in the presence of an HTS ring. The difference between these two quantities corresponds to the field created by the ring current. Since the H_{sol} field in the center of the solenoid is much greater than the field of the ring H_r , then the difference $(H_{sol} + H_r) - H_{sol}$ is determined with low accuracy. With greater accuracy, the value of the critical ring current can be obtained by measuring the field created by the current frozen in the ring after the applied H_{sol} has been reduced to zero. In this case, the Hall sensor measures only the field of the ring current, which can be calculated using the magnetic field formula in the center of a circular coil with current $H = J/2R$.

MEASUREMENT RESULTS

Fig. 2, a, presents, for example, the complete loop of the dependence of $J/J_c(H_{sol})$ of the ring current obtained in this way (reduced to the maximum value) on the value of the previously applied solenoid field in a zero external magnetic field. Please note that frozen in the ring, the current begins to deviate from zero at a value of $H_{sol} \sim 250$ Oe, and reaches saturation at twice the value of $H_{sol} \sim 500$ Oe, which should be expected when considering the process of flux capture in the ring [8]. Fig. 2, б, shows the initial section of a similar dependence obtained with a local field value $H_{loc} = 1200$ Oe, directed normally to the plane of the tape. It can be seen that in this case, flux capture (reaching J_c) begins at a lower value of $H_{sol} \sim 200$ Oe and reaches saturation at $H_{sol} \sim 400$ Oe, which indicates a decrease in J_c of the tape with increasing magnetic field.

Fig. 2. Dependences of the ring currents from the HTSC tape, creating a trapped flux in the ring after reducing the magnetic field of the solenoid from the value H_{sol} to zero.

The dependences are normalized to the maximum value of the ring current, which is taken as the critical current J_c .

a — the total loop $J/J_c(H_{sol})$ in a zero external magnetic field; б — initial section of the $J/J_c(H_{sol})$ dependence in the presence of a local magnetic field $H_{loc} = 1200$ Oe applied at an angle of 90° to the surface of the tape

Using the created device, measurements of the anisotropy J_c of a HTS tape were carried out in the angle range from -90° to 90° with a step of 5° for a number of locally applied magnetic fields with a maximum value of $H_{loc} = 1500$ Oe.

As an example, Fig. 3 shows one of the experimental dependences $J_c/J_{cmax}(\alpha)$, obtained at $H_{loc} = 1000$ Oe and $T = 77$ K. A number of features of this dependence are noteworthy: firstly, the non-monotonic dependence $J_c/J_{cmax}(\alpha)$, secondly, the shift of the J_c peak by 20° from the direction parallel to the plane of the tape; thirdly, the asymmetry of the dependence $J_c/J_{cmax}(\alpha)$ relative to $\alpha = 0^\circ$. In work [10] it was reported on measurements of the anisotropy of the critical current of a tape of the same composition and a sharp decrease in the critical current when deviating from $\alpha = 0^\circ$, as well as the asymmetry of the $J_c(\alpha)$ dependence.

Fig. 3. Dependence of the critical current of the tape, normalized to the maximum critical current, from the angle of application of the local magnetic field $H_{loc} = 1000$ Oe.

The zero angle corresponds to the orientation of the magnetic field parallel to the plane of the tape

CONCLUSION

A modification of the method for determining the critical current according to the magnetic flux trapped in the ring is proposed. The modified method makes it possible to measure the dependence of the critical current on the magnitude and orientation of the magnetic field using a pair of permanent magnets that create a local magnetic field in a section of the HTS tape. A device based on this method was implemented, and the dependence of magnetization on the magnetic flux of the solenoid and the critical current on the angle of application of local magnetic field for rings made of SuperOx HTS tape was obtained.

The dependence of magnetization on the magnetic field of the solenoid at zero external magnetic field shows that the current frozen in the ring begins to deviate from zero at a value of $H_{\text{sol}} \sim 250$ Oe, and reaches saturation at twice the value of $H_{\text{sol}} \sim 500$ Oe. Double field ratio saturation to the field of the beginning of current growth is preserved even when a local magnetic field is applied.

The dependences of the anisotropy of the critical current for this tape were obtained. The dependences demonstrate a significant asymmetry relative to the parallel ($\alpha = 0^\circ$) magnetic field, and a shift of the critical current peak by 20° .

The resulting data array shows the effectiveness of modifying the method for determining the critical current by capturing magnetic flux in a superconducting

ring. It is shown that the proposed method can be used to measure and control the characteristics of HTS tapes when designing and creating magnetic systems.

APPENDIX

Fig. II. Device (assembled) for non-contact measurements of the dependence of the critical current of a HTSC tape on the magnitude and orientation of the magnetic field