

05

## Терромагнитная стабильность и токнесущая способность REBCO-лент без медного покрытия при 4.2 К

© И.А. Ковалев, С.Л. Круглов, А.В. Поляков, Д.И. Шутова, В.И. Щербаков

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия  
e-mail: kruglov\_sl@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 марта 2021 г.

В окончательной редакции 31 марта 2021 г.

Принято к публикации 1 апреля 2021 г.

Экспериментально исследована токнесущая способность коммерческих высокотемпературных сверхпроводящих REBCO-лент второго поколения шириной 12 mm без стабилизирующего медного покрытия (ВТСП лента) в жидком гелии при скоростях ввода тока до 350 kA/s. В экспериментах образцы лент в виде колец со спаями размещались в рабочем объеме сверхпроводящего магнита при 4.2 К. Ток в образцах индуцировался трансформаторным способом. В процессе повышения скорости ввода тока в образцах-кольцах было обнаружено появление одиночных механических дефектов сверхпроводящего слоя в области спаев, вызывающее преждевременные переходы образцов в нормальное состояние. В результате максимально достигнутые токи в образцах-кольцах оказались до 50% ниже критических токов коротких образцов ВТСП лента при 4.2 К. В заключении приводится анализ результатов эксперимента. Даны возможные объяснения наблюдаемого эффекта. Кроме этого, исследована терромагнитная стабильность двух одинарных галет из пяти изолированных витков, намотанных из REBCO-лент разных производителей. Скачки магнитного потока не были обнаружены вплоть до скоростей изменения внешнего магнитного поля 1.7 T/s.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, высокотемпературные сверхпроводники, ВТСП ленты второго поколения, REBCO-ленты, критический ток, терромагнитная стабильность, скачок магнитного потока.

DOI: 10.21883/JTF.2021.08.51097.58-21

### Введение

Высокотемпературные сверхпроводящие ленты на основе редкоземельных керамик  $REBa_2Cu_3O_{7-x}$  (ВТСП ленты или REBCO-ленты, RE — обозначение редкоземельного металла Gd, Y и т.д.) используются при создании прототипов тоководов для ускорителей заряженных частиц [1,2], индукционных накопителей энергии [3], обмоток электрических машин [4] и будущих токамаков [5]. Исследование работоспособности этих относительно новых материалов в быстропеременных режимах является важной задачей. В настоящей работе мы исследовали в жидком гелии и сравнили динамические характеристики 12 mm коммерческих ВТСП лент без медного стабилизирующего покрытия от двух производителей: SuperPower [6] и SuperOx [7]. Результаты сравнительных экспериментов по измерению зависимости токнесущей способности ВТСП лента от скорости ввода тока, а также их терромагнитной стабильности в переменном магнитном поле, перпендикулярном к широкой стороне ленты, представлены в следующих разделах.

### 1. Образцы

Для исследования токнесущей способности одиночных ВТСП лента в зависимости от скорости ввода тока были изготовлены два экспериментальных образца, далее промаркированные как SP1 и SO1. Буквы обо-

значают название фирмы-производителя (Super Power или SuperOx), 1 — число ВТСП лент в образце. Каждый образец представлял собой замкнутое кольцо диаметром 95 mm со спаем (рис. 1). При изготовлении образцов концы ВТСП ленты соединялись встык сверхпроводящим слоем наружу. Затем на место соединения через слой 50Sn32Pb18Cd (145°C) припоя накладывалась перемычка длиной 30 mm из той же ленты, ориентированная „сверхпроводником к сверхпроводнику“. Сборка механически фиксировалась и нагревалась до 150°C в отжиговой печи. Собственная индуктивность образцов SP1 и SO1 составила  $L = 0.125 \mu\text{H}$ . Внешняя поверхность образцов покрывалась тепловой изоляцией в виде двух слоев полиимидной пленки общей толщиной 40  $\mu\text{m}$ . Для наблюдения за тем, как термоциклирование влияет на критические свойства ВТСП лента, а также для исследования их устойчивости к скачкам магнитного потока в переменном магнитном поле были изготовлены еще два образца в виде одиночных 5-витковых галет с изолированными витками (SP5 и SO5). Первый и пятый витки галет были электрически разомкнуты. Широкая сторона лент оклеена полиимидной пленкой толщиной 20  $\mu\text{m}$ . Характеристики всех изготовленных экспериментальных образцов сведены в табл. 1.

Все четыре образца размещались друг над другом на стеклотекстолитовой оправке в рабочем объеме сверхпроводящего магнита внешнего поля (рис. 2).

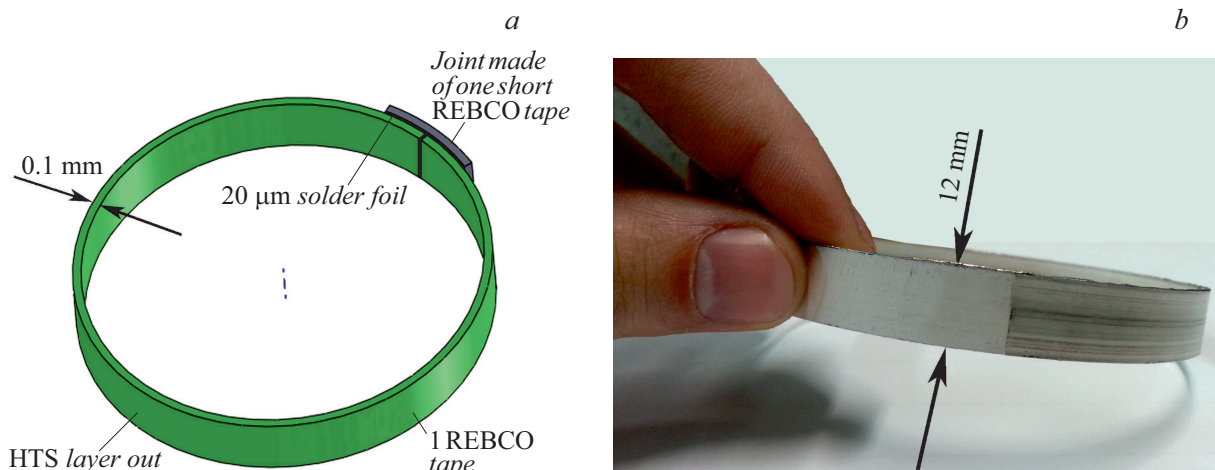


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и фотография (б) одноленточных экспериментальных образцов ВТСП лент SP1 и SO1.

Таблица 1. Характеристики экспериментальных образцов

Обозначение	Количество лент	Размеры поперечного сечения, мм	Вид образца	Производитель, марка
SP1	1	(12 × 0.1)	Кольца из 1 ВТСП ленты без медного покрытия со спаем	SuperPower SF12100
SO1	1	(12 × 0.1)		SuperOx
SP5	5	(12 × 0.7)	Одинарные галеты из 5 изолированных витков с разомкнутыми концами	SuperPower SF12100
SO5	5	(12 × 0.7)		SuperOx

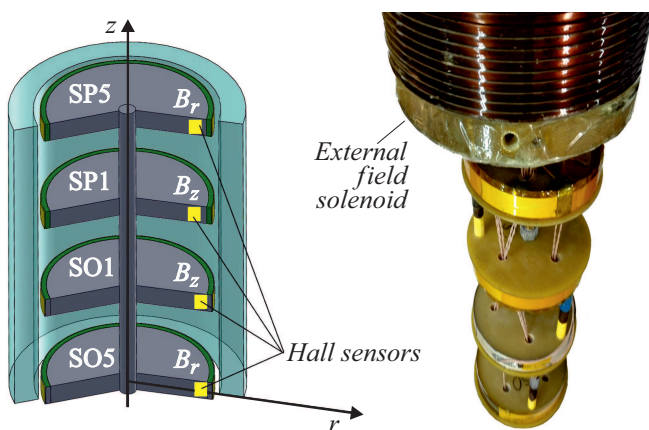


Рис. 2. Схематическое изображение (слева) и фотография (справа) экспериментальной вставки с образцами в рабочем отверстии сверхпроводящего соленоида.

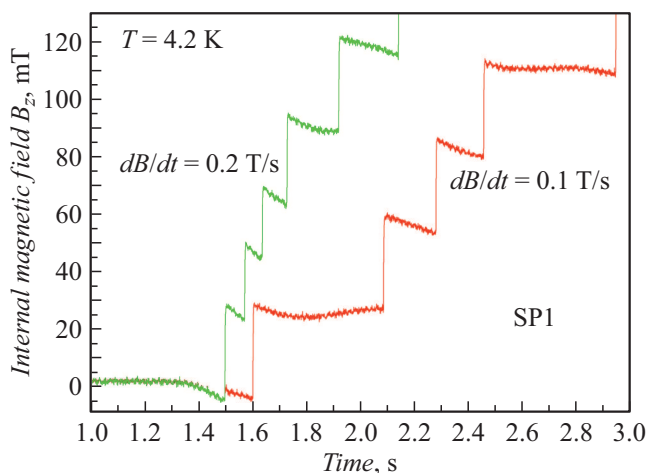
Обмотка соленоида внешнего поля с внутренним диаметром 102 мм, высотой 250 мм и индуктивностью 0.83 Н содержала 4290 витков NbTi композитного сверхпроводника диаметром 0.85 мм. Коэффициент

поле/ток в центре соленоида был равен 19.23 мТ/А. Образцы SP1 и SO1 из одной ВТСП ленты размещались симметрично во внутреннем объеме соленоида, а образцы из 5 лент SP5 и SO5 — на краях рабочего объема магнита с максимальной радиальной составляющей внешнего магнитного поля. Коэффициент взаимной индукции соленоида внешнего поля с образцами-кольцами SP1 и SO1 составил  $M = 0.127$  мН. Образцы SP1 и SO1 снабжались датчиками Холла, расположенными в стеклотекстолитовой оправке напротив спаев на радиусе 41 мм (внутренний радиус образцов 47.5 мм) в серединах высот образцов. Эти датчики измеряли внутреннее осевое магнитное поле ( $B_z$ ). У образцов SP5 и SO5 датчики Холла располагались на внутреннем радиусе образцов на середине их высоты. Они определяли радиальное магнитное поле, перпендикулярное широкой стороне ленты ( $B_r$ ). Изготовленные образцы были предварительно исследованы в жидком азоте в быстропеременных режимах [8]. При скоростях ввода тока до 350 кА/с токнесущая способность ВТСП лент снизилась незначительно по сравнению с критическим током короткого образца: на всего лишь на 10% для SP1 и на 20% для SO1.

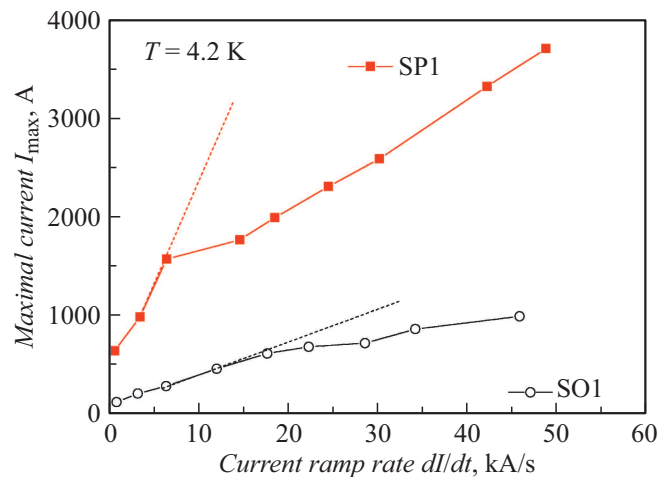
## 2. Эксперимент по определению зависимости токнесущей способности образцов одиночных лент от скорости ввода тока при 4.2 К

Методика экспериментов с образцами-кольцами из одиночных лент SP1 и SO1 при 4.2 К заключалась в следующем. Сверхпроводящий соленоид со вставкой с образцами располагался в испытательном криостате с жидким гелием. В соленоид внешнего поля вводится ток с различными скоростями от 1 А/с ( $dB_z/dt = 0.02$  Т/с) до 80 А/с ( $dB_z/dt = 1.6$  Т/с). При появлении внешнего возрастающего магнитного поля в образцах-кольцах наводится экранирующий ток обратного направления по отношению к току внешнего соленоида. Величина экранирующего тока определялась по разности величины расчетного внешнего поля и фиксируемого датчиком Холла внутреннего поля образца через коэффициент поле/ток образца (33.6 мТ/кА). Значение скорости ввода тока в образец определялось как максимальный экранирующий ток, деленный на время его достижения от начала процесса экранирования.

На рис. 3 представлены временные диаграммы внутреннего магнитного поля для образца SP1 при скоростях ввода тока в соленоид внешнего поля 5 А/с (0.1 Т/с) и 10 А/с (0.2 Т/с). Хорошо видны периоды экранирования образцом SP1 внешнего магнитного поля  $B_z$ . Незначительное отклонение внутреннего магнитного поля в область отрицательных значений объясняется неоднородностью радиального распределения осевого магнитного поля образца-кольца. Окончание периода экранирования („ступенька“) означает переход образца в нормальное состояние с последующим затуханием кольцевого экранирующего тока на возникшей нормальной зоне. При уменьшении тока снижается температура нормальной зоны и в какой-то момент времени она схлопывается.



**Рис. 3.** Временные диаграммы внутреннего магнитного поля для образца SP1 в жидком гелии при разных скоростях изменения внешнего магнитного поля.



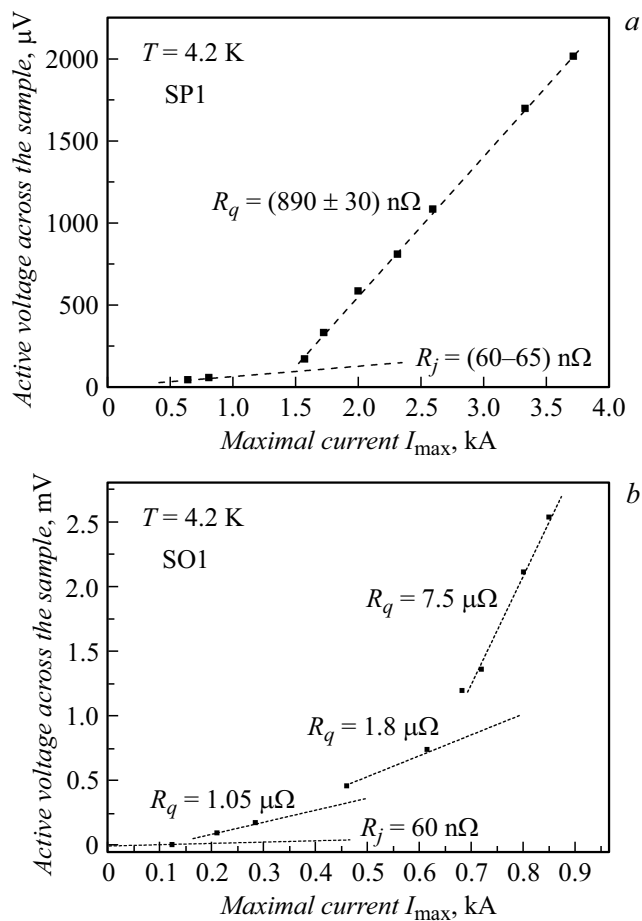
**Рис. 4.** Зависимость максимального экранирующего тока от скорости ввода для образцов SP1 и SO1 в жидком гелии.

Образец возвращается в сверхпроводящее состояние, и процесс экранирования возобновляется до следующего перехода. Образец SO1 вел себя аналогично.

На рис. 4 приведены результаты испытаний образцов в жидком гелии в виде зависимости максимально достигнутого экранирующего тока от скорости ввода. При скоростях ввода тока  $\leq 1$  кА/с (скорость ввода тока в соленоид внешнего поля 1 А/с) переходы в нормальное состояние отсутствовали. При таких малых скоростях максимальный экранирующий ток определялся тепловым равновесием между генерацией тепла в образце и теплоотводом в хладагент (аналогично поведению образцов в жидком азоте [8]). Все остальные точки на рис. 4 при более высоких скоростях ввода тока соответствуют переходу образцов в нормальное состояние. Рис. 4 демонстрирует необычные возрастающие с ростом скорости ввода тока зависимости максимальных экранирующих токов  $I_{\max}$ . Для сравнения значения критического тока лент без медного покрытия при 4.2 К в собственном магнитном поле составляют для образца SP1 — 6200 А, для SO1 — 4950 А (значения получены аппроксимацией от 10 К [9]).

Кроме того, на зависимостях  $I_{\max}(dI/dt)$  образцов явно присутствуют точки перегиба, разделяющие высокий начальный темп набора тока перехода с увеличением скорости ввода, и последующий, существенно более пологий ход кривой. Мы полагаем, что точки перегиба зависимостей  $I_{\max}(dI/dt)$  означают появления в образцах активных электрических сопротивлений, вызванных актами расщепления или трещинообразования в  $1 \mu\text{m}$  слое сверхпроводящей керамики.

Активное электрическое напряжение в образце в моменты переходов в нормальное состояние можно вычислить из разности ЭДС индукции, задаваемой в образце при вводе тока во внешний соленоид (первичная обмотка) и индуктивного напряжения в образце (вторичная обмотка), определяемого экспериментально,



**Рис. 5.** Зависимость активного напряжения на образцах SP1 (а) и SO1 (б) от максимального экранирующего тока при переходе в нормальное состояние.

через скорость набора экранирующего тока до момента перехода:

$$U_q = M dI_p/dt - L dI_s/dt, \quad (1)$$

где  $U_q$  — электрическое напряжение,  $M$  — коэффициент взаимной индукции между соленоидом и образцом,  $L$  — собственная индуктивность образца-кольца,  $dI_p/dt$  — скорость ввода тока в соленоид — первичную обмотку,  $dI_s/dt$  — скорость набора тока в образце — вторичная обмотка.

Активное электрическое сопротивление в динамическом режиме определяется из зависимости  $U_q(I)$  через выражение

$$R_q = dU_q/dI. \quad (2)$$

На рис. 5 представлены зависимости активного напряжения в образцах от максимального экранирующего тока, за исключением первых точек при низких скоростях, когда переходов образцов в нормальное состояние не было. Там же обозначены сопротивления на линейных участках, где справедлив закон Ома. На зависимостях явно прослеживаются области с разными величинами сопротивлений. Низкие значения сопротивлений можно

трактовать как сопротивление спаев образцов ( $R_j$ ). При низких ЭДС индукции в образцах-кольцах спай определяет максимальный экранирующий ток. На больших скоростях при определенном значении экранирующего тока происходит акт расслоения или растрескивания сверхпроводника с выделением тепла непосредственно в сверхпроводящем слое, вызывающий переход образца в нормальное состояние. В результате в образце появляется локальный дефект с существенно более низким значением критического тока.

Появление сопротивления, значительно превышающего сопротивление спаев, означает, что наведенный в образце ток в процессе экранирования обходит появившийся дефект по серебряному покрытию ленты. Обращает на себя внимание факт существенно более высокого значения установившегося активного электрического сопротивления у образца SO1 по сравнению с образцом SP1. Возможно, это означает появление не одного, а нескольких дефектов сверхпроводящего слоя у SO1.

Длину поврежденного участка можно оценить, приравняв установившуюся величину активного сопротивления к сопротивлению серебряного покрытия на этом участке. Оценки показывают, что, например, при 4.2 K у образца SP1 в серебряном слое с  $RRR = 25$  (residual resistance ratio) длина обхода дефекта равна  $63 \text{ }\mu\text{m}$ , а у образца SO1 0.52 mm. По-видимому, акты расслаивания или трещинообразования в сверхпроводящем слое происходили в перемычке спая и снижали локальный критический ток образца SP1 в разы, а у образца SO1 — в десятки раз. Причиной их появления могла быть комбинация трех сил:

- сжимающей тонкий ВТСП слой осевой силы Ампера (взаимодействие экранирующего тока и собственного радиального магнитного поля);

- прижимающей к оправке силы в радиальном направлении (взаимодействие экранирующего тока и внешнего поля);

- растягивающей силы в тангенциальном направлении из-за перегрева перемычки спая джоулевым теплом.

Причем, первые две силы были приложены к тончайшему сверхпроводящему слою, а третья — ко всему сечению ВТСП ленты [10–12].

Все последующие переходы образцов уже были вызваны нагревом места дефекта до критической температуры. Оценки показывают, что, например, для образца SP1 критические перегревы ( $\Delta T_{cs}$ ) составляют 64 K для тока перехода 807 A (0.6 kA/s) и 26 K для тока перехода 3704 A (49 kA/s). Такие перегревы вполне возможны, поскольку большое тепловое сопротивление между „горячим пятном“ на образце и жидким гелием позволяет отводить тепло с коэффициентом теплоотдачи не выше  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

После окончания всех измерений для сравнения критических токов при 77 K до и после опытов с жидким гелием образцы-кольца с дефектами SP1 и SO1 были разрезаны напротив спая с перемычкой. С них были

**Таблица 2.** Критические токи образцов при 77 К до и после испытаний в жидком гелии

Образец		SP1	SO1	SP5	SO5
$I_c, A$	до эксперимента в жидком гелии	363	500	363	500
	после эксперимента в жидком гелии	99	20	363	365

сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ) для определения критических токов по критерию  $1 \mu V/cm$ . При длине образца в 30 см длина припайки токовводов к каждому разрезанному концу составляла 27 мм. Также ВАХ были сняты с контрольных образцов SP5 и SO5. Результаты измерений сведены в табл. 2.

Видно резкое снижение критического тока у образцов SP1 и, особенно, у SO1, у которого размер дефекта в 8 раз больше. Кроме этого критический ток образца-свидетеля SO5 деградировал с 500 до 365 А, практически сравнявшись с критическим током образца SP5. Возможная причина деградации образца SO5 указана в разд. 3.

### 3. Эксперимент по определению устойчивости к скачкам магнитного потока у 5-витковых ВТСП галет с разомкнутыми концами при 4.2 К

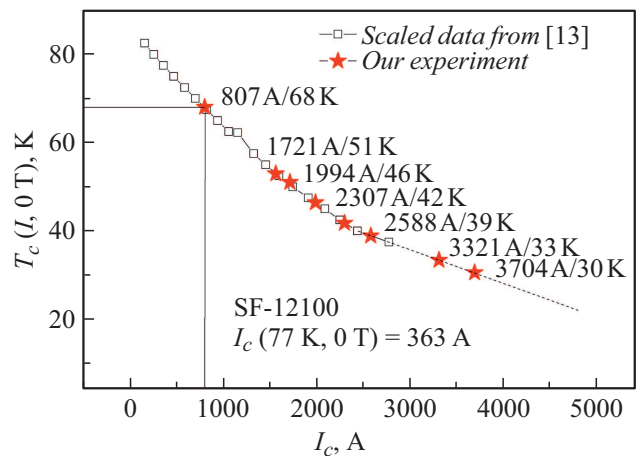
Методика экспериментов по исследованию устойчивости к скачкам магнитного потока в переменном магнитном поле, перпендикулярном широкой стороне ленты состояла в следующем. Снимались временные диаграммы сигналов с датчиков Холла образцов SP5 и SO5 при разрядах сверхпроводящего магнита внешнего поля на внешние сопротивления.

Скачок магнитного потока представляет собой очень быстрое проникновение магнитного поля в центр образца при разрушении замкнутой петли экранирующих токов с нагревом образца до критической температуры. Фактически временная диаграмма сигнала с датчика Холла (внутреннее поле образца) носит форму ступеней, поскольку при охлаждении образца после скачка процесс экранирования продолжается до следующего скачка [13].

Самым консервативным является критерий адиабатической стабильности для теплоизолированного сверхпроводника [14], к которому очень близки образцы SP5 и SO5. Этот критерий получен в модельном представлении сверхпроводника пластиной, находящейся в параллельном к ее поверхности внешнем магнитном поле:

$$B_p \leq 0.5\pi \sqrt{\mu_0 C T_0}, \quad (3)$$

где  $T_0 = j_c / |\partial j_c / \partial T|$ ,  $B_p [T]$  — поле проникновения в центр образца при возрастании внешнего магнитного поля от нуля (максимальный перепад магнитного поля в сечении пластины при экранировании, в соответствии



**Рис. 6.** Зависимость критической температуры ВТСП ленты от критического тока.

с моделью критического состояния),  $C [J/(m^3 \cdot K)]$  — объемная теплоемкость сверхпроводника,  $T [K]$  — температура сверхпроводника,  $j_c [A/m^2]$  — критическая плотность тока сверхпроводника.

Для низкотемпературных сверхпроводников с линейной зависимостью  $j_c(T)$  выполняется условие

$$j_c / |\partial j_c / \partial T| = T_c - T_b, \quad (4)$$

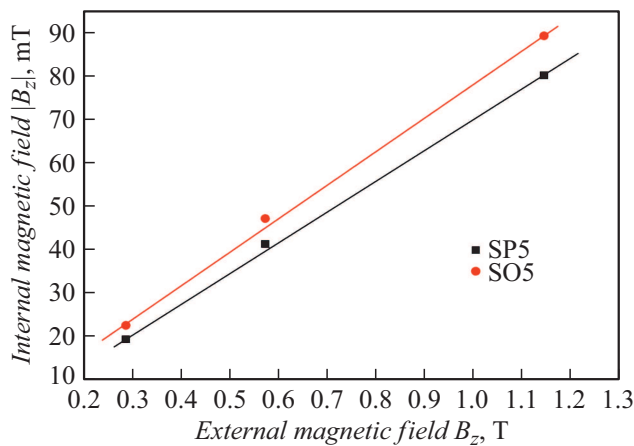
где  $T_c = T_c(0, B)$  — критическая температура, зависящая от индукции магнитного поля,  $T_b$  — температура хладагента.

Для ВТСП зависимость  $j_c(T)$  не является линейной. Чтобы оценить  $T_0$  и  $B_p$ , например, для образца SP5 можно использовать известную зависимость  $I_c(T)$  в нулевом внешнем поле для ленты SuperPower ( $4 \times 0.1$ ) мм без медного покрытия [15], перенормированную на ленту  $12 \times 0.1$  мм из наших экспериментов (рис. 6).

Во всем диапазоне значений тока перехода от 807 А (68 К) до 3704 (30 К)  $T_0$  лежит в пределах 26–30 К. Используя значение  $T_0 = 30$  К, получаем из (3)  $B_p = 0.99$  Т. Достижение радиальной составляющей внешнего магнитного поля на образце этого значения без скачка магнитного потока означает термомагнитную стабильность образцов.

При токе соленоида 200 А радиальная составляющая поля в месте расположения образцов в эксперименте составила  $B_r = 1.14$  Т. Были выполнены два последовательных ввода тока в соленоид внешнего поля до 200 А со скоростью 5 А/с при контроле сигналов с датчиков Холла образцов SP5 и SO5 и затем разряды на внешние сопротивления  $0.4 \Omega$  ( $dB/dt = 0.55$  Т/с) и  $1.2 \Omega$  ( $dB/dt = 1.66$  Т/с) с записью временных диаграмм сигналов.

На рис. 7 представлена зависимость абсолютных значений сигналов с датчиков Холла (величины внутреннего радиального поля  $|B_r|$ ) от внешнего радиального поля соленоида при первом вводе тока в со-



**Рис. 7.** Зависимость модуля внутреннего радиального магнитного поля образцов SP5 и SO5 от радиального внешнего поля.

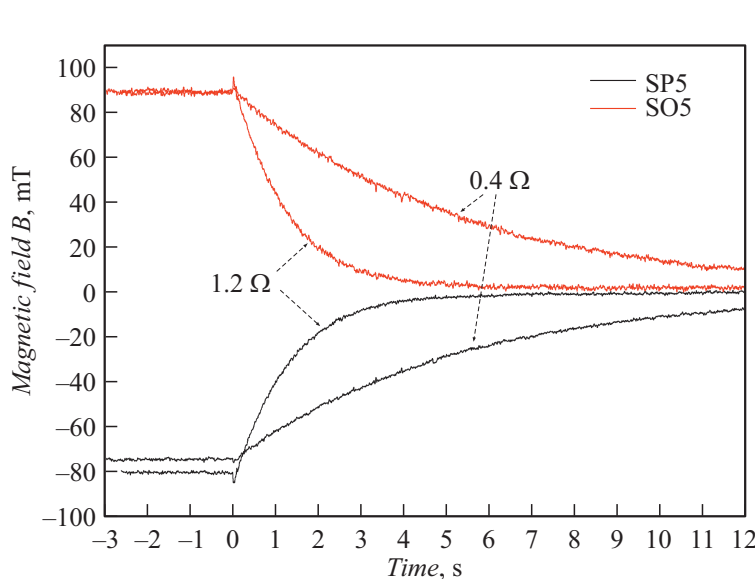
леноид до 200 А. Скачки магнитного потока отсутствовали вплоть до достижения поля полного проникновения  $B_p$ . Относительно небольшие радиальные магнитные поля, фиксируемые датчиками и составляющие  $\sim 8\%$  от внешнего радиального поля, объясняются: во-первых, расположением датчиков не в центре толщины образцов, а на их внутренних радиусах (краевой эффект); во-вторых, неоднородностью экранирующего поля.

На рис. 8, *a* приведены временные диаграммы сигналов датчиков Холла (внутренние радиальные поля) при разрядах соленоида с током 200 А на внешние сопротивления 0.4 и 1.2  $\Omega$ . Противоположные знаки этих полей объясняются расположением образцов на

торцах соленоида, где радиальные составляющие поля направлены в разные стороны. Временная разница в 3–4 с между окончанием ввода тока в 200 А и началом разряда ( $t = 0$ ) требовалась для включения аппаратуры. Разница сигналов датчика образца SP5 при первом и втором вводах тока в соленоид до 200 А и последующих разрядах (рис. 8, *a*) стала ясна после разбора экспериментальной установки.

У образца SP5 уступ оправки располагался внизу, а осевое силовое взаимодействие экранирующих токов и внешнего радиального поля из-за разницы полей на краях образца приводило к результирующей силе Ампера, направленной вверх от уступа. На рис. 8, *b* показана фотография образца SP5 (верхний образец) после демонтажа, где виден небольшой зазор между уступом оправки и образцом, который сдвинулся вверх на расстояние  $\sim 1$  мм. При этом внутреннее радиальное поле образца SP5 немного изменилось, что и было зарегистрировано на рис. 8, *a*. Эта сдвигка SO5 привела к безупорному положению верхней части образца, его возможному изгибу и дальнейшей деградации критического тока.

Характерные времена затухания сигналов датчиков существенно больше характерных времен разрядов соленоида на внешние сопротивления:  $\tau_d = 2.07$  s (0.4  $\Omega$ ) и  $\tau_d = 0.69$  s (1.2  $\Omega$ ). Это более долгое затухание связано с постепенным уменьшением захваченного образцами магнитного потока и его характерные времена можно использовать для оценки собственного электрического сопротивления сверхпроводника в динамическом режиме. Совпадение этих характерных времен для образцов SP5 и SO5 означает примерно одинаковую критическую плотность тока.



**Рис. 8.** Временные диаграммы внутреннего радиального магнитного поля образцов SP5 и SO5 (сигналы датчиков Холла) при разрядах соленоида с током 200 А на внешние сопротивления (*a*) и фото экспериментальной сборки образцов после демонтажа (*b*). Видно смещение от уступа верхнего образца SP5.

Основным результатом этой части работы является подтвержденный экспериментальный факт термомагнитной стабильности (устойчивости к скачкам магнитного потока) 12 mm ВТСП лент без медного покрытия компаний SuperPower и SuperOx в перпендикулярном к широкой стороне ленты переменном магнитном поле вплоть до скоростей 1.7 Т/с.

## Заключение

В работе в жидком гелии при 4.2 К на ВТСП лентах второго поколения от производителей SuperPower и SuperOx шириной 12 mm без медного стабилизирующего покрытия исследованы:

– влияние скорости ввода тока (до 350 кА/с) на токнесущую способность образцов-колец со спаями;

– устойчивость к скачкам магнитного потока (термомагнитная стабильность) в переменном магнитном поле (до 1.7 Т/с), перпендикулярном к широкой стороне ленты, на одинарных галетах с пятью электрически изолированными витками.

В образцах-кольцах обнаружено появление единичных механических дефектов, предположительно, в перемычках спаев. Установившиеся сопротивления и размеры дефектов составили:  $\sim 1 \mu\Omega$  и  $\sim 60 \mu\text{m}$  у образца SP1,  $7.5 \mu\Omega$  и  $\sim 0.5 \text{mm}$  у образца SO1. Зафиксировано значительное снижение критического тока при 77 К в разрезанных впоследствии кольцах: от 363 до 99 А (в 3.7 раза) у образца SP1, и от 365 до 20 А (в 18 раз) у образца SO1. Джоулево тепловыделение на появившихся дефектах при обходе током поврежденного участка по серебряной матрице приводило к локальным перегревам и преждевременным переходам в нормальное состояние. Максимально достигнутые токи образцов при скорости ввода тока 50 кА/с и магнитного поля 1.55 Т/с оказались существенно меньше критических при 4.2 К: у образца SP1 на 65%, у образца SO1 — практически в 5 раз.

Во второй серии экспериментов установлен факт устойчивости к скачкам магнитного потока (термомагнитной стабильности) 12 mm ВТСП лент без медного покрытия компаний SuperPower и SuperOx в перпендикулярном к широкой стороне ленты магнитном поле, изменяющемся со скоростями до 1.7 Т/с.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании ВТСП устройств с переменным режимом работы.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке НИЦ „Курчатовский институт“.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] R. Heller, W.H. Fietz, F. Groner, M. Heiduk, M. Hollik, C. Lange, R. Lietzow. *Supercondu. Sci. Technol.*, **31** (5), 055014 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aab5f9>
- [2] I.A. Kovalev, M.I. Surin, A.V. Naumov, M.S. Novikov, S.I. Novikov, A.A. Ilin, A.V. Polyakov, V.I. Scherbakov, D.I. Shutova. *Cryogenics*, **85**, 71 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.05.009>
- [3] A. Kumar, J.V. Muruga, L. Jeyan, A. Agarwal. *Physica C*, **558**, 17 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.01.001>
- [4] Y. Zhang, Y. Zhu, X. Wang, Y. Zeng, X. Liu, Y. Lei, Q. Zhou, W. Wang, Y. Gao, Z. Huang, H. Ye. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **30** (4), 4601005 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2971453>
- [5] A.J. Creely, M.J. Greenwald, S.B. Ballinger, D. Brunner, J. Canik, J. Doody, T. Fülöp, D. Garnier, R. Granetz, T.K. Gray, C. Holland. *J. Plasma Phys.*, **86** (5) (2020). DOI: [doi:10.1017/S0022377820001257](https://doi.org/10.1017/S0022377820001257)
- [6] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>
- [7] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.superox.ru/>
- [8] А.А. Ильин, И.А. Ковалёв, С.Л. Круглов, А.В. Поляков, Д.И. Шутова, В.И. Щербаков. *Кабели и провода*, **1** (375), 10 (2019).
- [9] M. Jirsa, M. Rameš, I. Ďuran, T. Melišek, P. Kováč, L. Viererbl. *Supercond. Sci. Technol.*, **30**, 045010 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa5bbf>
- [10] Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsud, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi, H. Maeda. *Physica C*, **471** (16–16), 480 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.003>
- [11] L. Liu, Y. Zhu, X. Yang, T. Qiu, Y. Zhao. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26** (6), 6603406 (2016). DOI: [10.1109/TASC.2016.2555915](https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2555915)
- [12] M.A. Diaz, H. Shin, H. Ha, S. Oh. *Prog. Supercond. Cryog.*, **21** (4), 34 (2019). DOI: <https://doi.org/10.9714/psac.2019.21.4.034>
- [13] С.Л. Круглов, Д.И. Шутова, В.И. Щербаков. *ЖТФ*, **87** (2), 211 (2017). DOI: [10.21883/JTF.2017.02.44127.1872](https://doi.org/10.21883/JTF.2017.02.44127.1872) [S.L. Kruglov, D.I. Shutova, V.I. Shcherbakov. *Tech. Phys.*, **62** (2), 237 (2017)] DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784217020165>
- [14] R. Hancox. *Phys Lett.*, **148** (1), 231 (1966).
- [15] N.M. Strickland, S.C. Wimbush. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27**, 8000505 (2016). DOI: [10.1109/TASC.2016.2636561](https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2636561)