

А.А. Ильин, ведущий специалист;
И.А. Ковалёв, канд. техн. наук, начальник лаборатории;
С.Л. Круглов, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник;
А.В. Поляков, ведущий специалист;
Д.И. Шутова, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник;
В.И. Щербаков, главный специалист;
 Национальный исследовательский центр
 «Курчатовский институт»

Динамические режимы токонесущих элементов на основе ВТСП

Аннотация. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) второго поколения используются при создании сверхпроводящих кабелей переменного тока, в токовводах ускорителей заряженных частиц, индуктивных накопителях энергии, обмотках электрических машин и т.д. Сильноточные сверхпроводящие устройства требуют разработки многоленточных токонесущих элементов (ТНЭ) на основе ВТСП. В последнее время получили распространение многоленточные пакеты ВТСП-лент, пропаянные по всей длине для тепловой и механической устойчивости. Исследование работоспособности таких ТНЭ в динамических режимах и определение их предельных рабочих параметров является важной практической задачей.

В работе исследованы образцы ВТСП ТНЭ (1 и 5 лент в пакете) из лент производителей Super Power SF12100 и SuperOx в жидком азоте при высоких скоростях ввода тока. Описана оригинальная методика запитки образцов трансформаторным методом. Найдены допустимые скорости изменения тока и внешних магнитных полей. Экспериментально подтверждено, что при температуре жидкого азота исследованные образцы обладают высокой тепловой стабильностью при скоростях изменения тока вплоть до 320 кА/с. Полученные результаты сопоставлены с динамическим режимом ВТСП-токовводов (концевых токовых муфт) в Российском коллайдере НИКА.

Ключевые слова: сверхпроводящие кабели переменного тока; токонесущий элемент; высокотемпературные сверхпроводники второго поколения; ВТСП-ленты; REBCO.

Abstract. Second generation (2G) high temperature superconductors (HTS) are used in AC superconducting cables, current leads for charged particle accelerators, inductive energy storage systems, windings of motors and generators, etc.

High-current superconducting devices require the development of multi-tape current-carrying elements (CCE) on the basis of HTS. Recently HTS REBCO stacks, soft-soldered along the entire length for thermal and mechanical stability, have become widespread. The study of the performance of such CCEs under dynamic modes and the determination of their limit operating parameters is an important practical task.

The authors experimentally investigated specimens of HTS conductors made of up to 5 REBCO tapes produced by SuperPower and SuperOx in liquid nitrogen at extremely high ramp rates. A new specimen charging technique was developed. The acceptable current and magnetic field ramp rates were determined. A high thermal stability for REBCO conductors in liquid nitrogen was experimentally confirmed at ramp rates up to 320 kA/s. The experimental results are compared with the operational dynamic mode of HTS current leads for the Russian NICA accelerator complex.

Key words: AC superconducting cables; current-carrying elements; superconductors; second generation high temperature superconductors; high temperature superconducting tapes; REBCO tapes.

Материал поступил в редакцию 30.01.2019
 Круглов С.Л. E-mail: kruglov-sl@yandex.ru

Введение

Высокотемпературные сверхпроводники второго поколения (ВТСП-2) используются при создании токовводов для ускорителей заряженных частиц, индуктивных накопителей энергии, обмоток электрических машин и т.д. Исследование работоспособности этих относительно новых материалов в динамических режимах является важной задачей.

В последнее время в сильноточных сверхпроводящих устройствах стали использоваться пакеты ВТСП-лент, пропаянных по всей длине для обеспечения механической и тепловой стабильности [1, 2]. В этой работе мы

исследовали токонесущую способность ленточных ВТСП-2 проводников шириной 12 мм без медного покрытия двух производителей: Super Power SF12100 (далее SP) [3] и SuperOx (далее SO) [4] – в зависимости от скорости ввода тока. Экспериментальная методика, свойства изготовленных образцов и полученные результаты описаны в следующих разделах.

Образцы

Для наведения тока в одиночных и многоленточных пакетах ВТСП-лент трансформаторным методом были изготовлены экспериментальные образцы в виде

Характеристики экспериментальных образцов

Обозначение	Количество лент	Размеры поперечного сечения, мм ²	Вид образца	Производитель, марка
s1 (SP)	5	(12×0,6)	Кольцо из 5 спаянных лент	SuperPower SF12100
s2 (SP)	1	(12×0,1)	Кольцо из 1 ленты со спаем	SuperPower SF12100
s3 (SO)	1	(12×0,1)		SuperOx
s4 (SP)	5	(12×0,7)	Одинарные галеты из 5 изолированных витков с разомкнутыми концами (контрольные образцы)	SuperPower SF12100
s5 (SO)	5	(12×0,7)		SuperOx

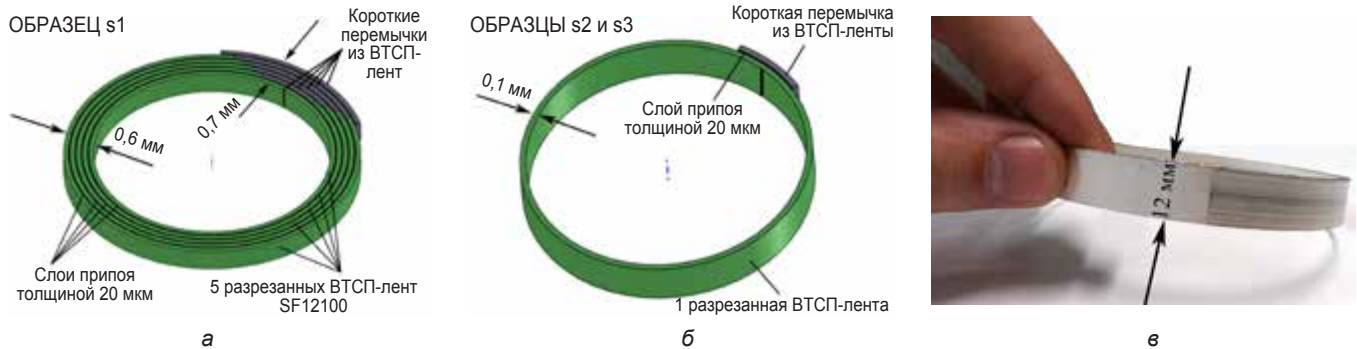


Рис. 1. Экспериментальные образцы: а – s1 (5 лент SP); б – образцы s2 (1 лента SP) и s3 (1 лента SO); в – фото готового образца s1

замкнутых колец диаметром 95 мм (рис. 1). Параметры изготовленных образцов сведены в табл. 1.

В одноленточных образцах s2 и s3 концы отрезка ленты соединялись встык. Затем на место соединения через двадцатимикронный слой припоя ПОСК (145 °С) симметрично накладывалась ВТСП-перемычка длиной 30 мм из той же ленты, ориентированная «сверхпроводником к сверхпроводнику». Сборка механически фиксировалась и нагревалась до 150 °С в отжиговой печи.

Пятиленточный образец s1 имитировал пакет ВТСП-лент для сильноточных тоководов ускорителей. Геометрия разрезанных пяти ВТСП-колец с перемычками разной длины (от 30 мм до 150 мм) и фотография готового образца s1 показаны на рис. 1а и 1в.

Кроме этого, были изготовлены 2 контрольных образца s4 (SP) и s5 (SO), состоящие из 5 изолированных полиимидной пленкой витков 12×0,7 мм² с разомкнутыми концами (без спаев). Они предназначались для наблюдения за тем, как термоциклирование повлияет на критические свойства сверхпроводников.

Эксперимент

На рис. 2 представлено поперечное сечение и фотография экспериментальной установки. Все образцы одновременно размещались друг над другом на стеклотекстолитовых оправках в рабочем отверстии сверхпроводящего соленоида внешнего поля. Обмотка соленоида, диаметром 102 мм, высотой 250 мм, и индуктивностью $L = 0,83$ Гн, содержала 4290 витков NbTi композитного сверхпроводника диаметром 0,85 мм.

В замкнутые кольца образцов s1, s2, и s3, размещённые в криостате с жидким азотом, ток вводился трансформаторным способом. На внутреннем радиусе

каждого образца были установлены датчики Холла. Кроме того, на образце s1 был установлен угольный термометр, расположенный на внешней поверхности образца напротив спая.

В ходе экспериментов в жидком азоте на соленоид внешнего поля производился разряд конденсаторной батареи для возбуждения электромагнитных колебаний. При росте магнитного поля во внешнем соленоиде на первой полуволне разряда в замкнутых образцах наводится экранирующий ток обратного направления. Внутренняя область образцов магнитно экранировалась. Характеристики колебательного контура и индуктивности образцов приведены в табл. 2.

Временная зависимость внутреннего (эксперимент) и внешнего (расчёт) магнитных полей для образцов s1

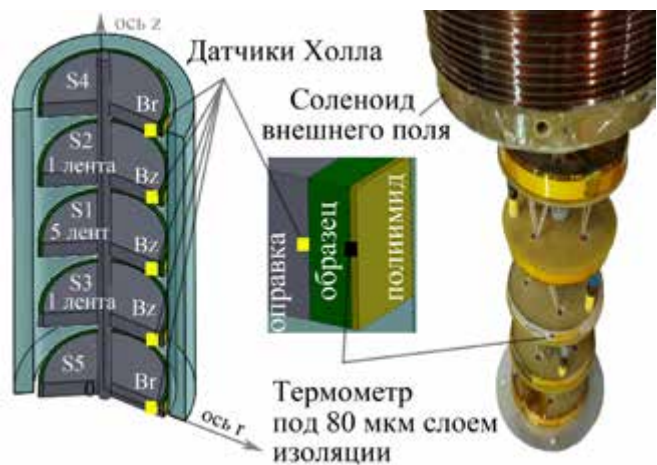


Рис. 2. Поперечное сечение и фотография экспериментальной установки с образцами

Таблица 2

Характеристики колебательного контура

Сопротивление	12,7 Ом	
Ёмкость	1,18 мФ	
Индуктивность соленоида	0,83 Гн	
Характерное время разряда	0,13 с	
Максимальное напряжение	400 В	
Максимальная скорость роста поля	8 Тл/с	
Коэффициент поле/ток в центре соленоида	19,23 мТл/А	
Частота колебаний	5 Гц	
Индуктивность образцов s1, s2, s3	0,175 мкГн	
Коэффициенты взаимной индукции с соленоидом внешнего поля	s1	0,129 мГн
	s2, s3	0,127 мГн

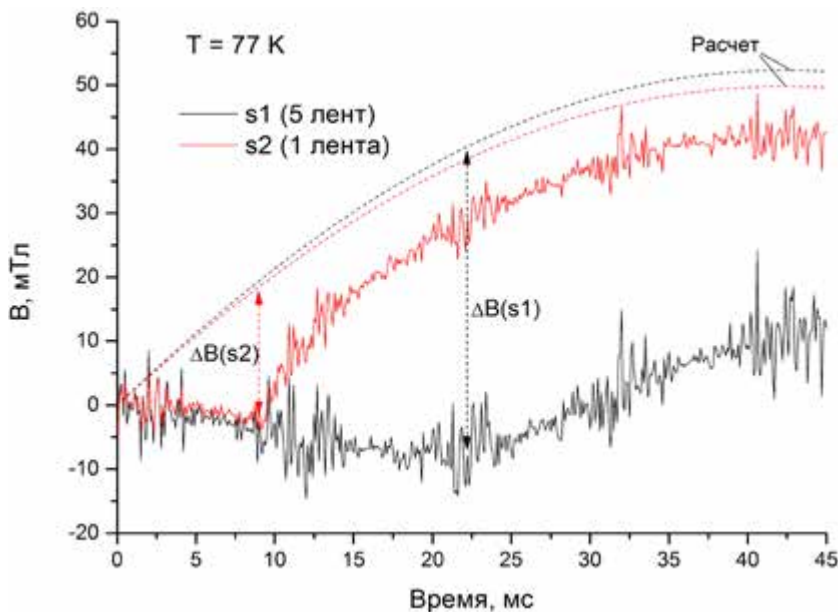


Рис. 3. Зависимость от времени внутреннего (эксперимент) и внешнего (расчёт) магнитных полей образцов s1 и s2 (SuperPower) при разряде конденсатора на соленоид с $U = 100 \text{ В}$ ($dB/dt = 2 \text{ Тл/с}$) в жидком азоте

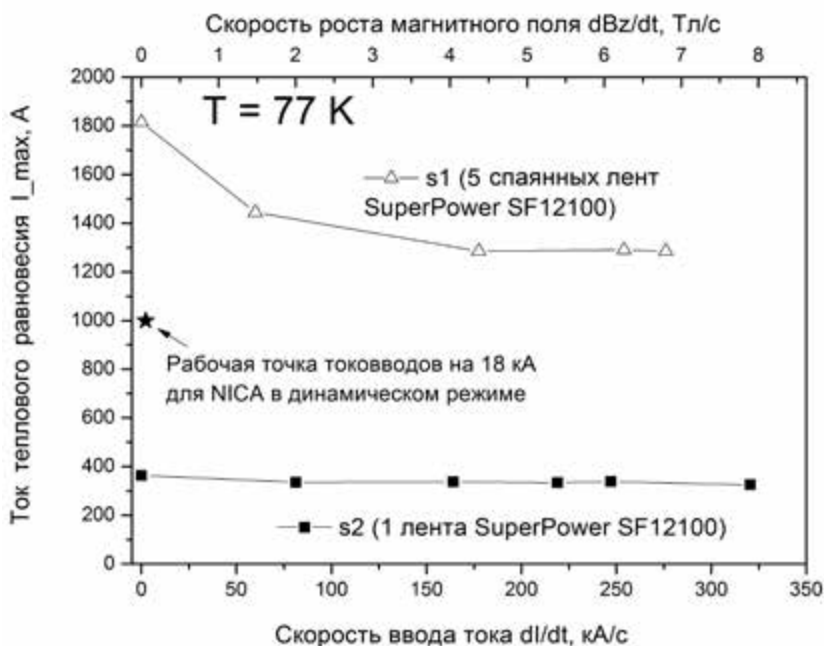


Рис. 4. Экспериментальные зависимости тока теплового равновесия для образцов из ленты SuperPower s1 (5 лент) и s2 (1 лента) от скорости ввода тока

(5 лент SP) и s2 (1 лента SP) в жидком азоте на примере разряда батареи конденсаторов с напряжением 100 В ($dB/dt = 2 \text{ Тл/с}$) показана на рис. 3. При оцифровке в 10 кГц сигналы приведены с шумами, чтобы математическая обработка не искажала физической картины. Незначительное отклонение внутреннего магнитного поля в область отрицательных значений объясняется неоднородностью радиального распределения осевого поля.

Моменты появления магнитного поля внутри образцов означают, что экранирующий ток достиг максимального значения I_{max} . Величина тока определялась по разнице величины расчётного внешнего поля и фиксируемого датчиком Холла внутреннего поля образца $\Delta B(s1)$ и $\Delta B(s2)$. Значение скорости ввода тока в образец определялось, как максимальный экранирующий ток, делённый на время его достижения от начала процесса разряда. Максимально достигнутые токи в наших экспериментах можно также определить, как ток тепловой устойчивости, который определяется тепловым равновесием между генерацией тепла в сверхпроводящей ленте и теплоёмкостью хладагента [5].

Результаты и обсуждение

Результаты серии экспериментов с разными скоростями наведения тока в образцах показаны на рис. 4 в виде зависимостей $I_{max}(dI/dt)$. Относительная ошибка в определении экспериментальных значений тока тепловой устойчивости задавалась методикой обработки сигналов с датчиков Холла образцов и не превышала 5%. Представлены экспериментальные зависимости тока теплового равновесия для образцов из ленты SuperPower s1 (5 лент) и s2 (1 лента) от скорости ввода тока. На верхней горизонтальной оси графика показана скорость увеличения роста внешнего осевого магнитного поля dB/dt , параллельного широкой стороне образцов на их внешних радиусах.

При увеличении скорости ввода тока до 260 кА/с ток теплового равновесия ВТСП-пакета s1 снизился на ~ 30% (с 1815 А до 1285 А). Ток образца из одиночной ленты s1 снизился незначительно, примерно на 10%: $I_{max}(1 \text{ А/с}) = 360 \text{ А}$ и $I_{max}(320 \text{ кА/с}) = 325 \text{ А}$. Также на рис. 4 для сравнения показана рабочая точка динамического режима ВТСП-тоководов коллайдера НИКА [6]. Видно, что единичный пакет из

5 спаянных ВСП-2 лент обладает большим запасом тепловой устойчивости в режиме работы реального устройства.

На рис. 5 показано сравнение результатов измерений для образцов из одиночных лент s2 (1 лента SuperPower) и s3 (1 лента SuperOx). Образец s3 из 1 ленты SuperOx продемонстрировал 20 % снижение тока теплового равновесия с 500 А (1 А/с) до 401 А (290 кА/с).

Заключение

В работе исследована токнесущая способность ВСП-лент второго поколения в экстремальных динамических режимах при температуре жидкого азота. Предложенная методика эксперимента, в которой образцы сверхпроводящих лент в виде замкнутых колец экранировали внешнее быстропеременное магнитное поле, позволила измерить свойства образцов при скоростях ввода тока до 320 кА/с.

Сравнительные эксперименты подтвердили высокую тепловую стабильность ВСП-лент как в одноленточных образцах, так и паяных пачках из 5 лент, при скоростях изменения внешнего магнитного поля вплоть до 8 Тл/с.

Измеренное падение токов теплового равновесия составило: 10 % для образцов из одиночной ленты SuperPower, 20 % для образцов из одиночной ленты SuperOx, 30 % для образцов из пяти пропаянных лент SuperPower. В дальнейшем мы планируем провести аналогичные испытания в жидком гелии. Полученные результаты могут оказаться полезны при проектировании быстроциклирующих сильноточных сверхпроводниковых устройств.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 17-29-10005 офу_м, АААА-А18-118122490093-8, номер договора 17-29-10005\18.

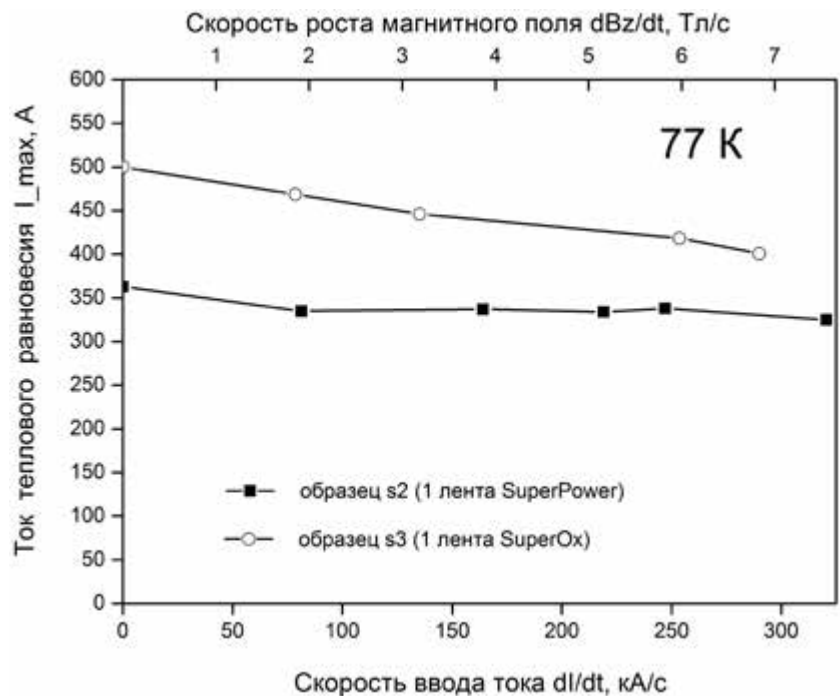


Рис. 5. Экспериментальные зависимости тока теплового равновесия для одноленточных образцов s2 (из ленты SuperPower) и s3 (из ленты SuperOx) от скорости ввода тока

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Heller, W.H. Fietz, F. Gröner, M. Heiduk, M. Hollik, C. Lange and R. Lietzow. Test results of a 20 kA high temperature superconductor current lead using REBCO tapes // Superconductor Science and Technology. – 2018. – Vol. 31 (5). – P. 055014.
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, and D.I. Shutova. Test results of 12/18 kA ReBCO coated conductor current leads // Cryogenics. – 2017. – Vol. 85. – P. 71–77.
3. <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire> (дата обращения: 28.01.2019).
4. <http://www.superox.ru/> (дата обращения: 28.01.2019).
5. A.L. Rakhmanov, V.S. Vysotsky, Yu.A. Ylyin, T. Kiss, and M. Takeo. Universal scaling law for quench development in HTSC devices // Cryogenics. – 2000. – Vol. 40 (1). – P. 19–27.
6. I.A. Kovalev, M.I. Surin, A.V. Naumov, M.S. Novikov, S.I. Novikov, A.A. Ilin, A.V. Polyakov, V.I. Scherbakov, and D.I. Shutova. HTS current leads for the NICA accelerator complex // Cryogenics. – 2018. – Vol. 94. – P. 45–55.

ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на I полугодие 2019 года (3 номера), в рублях:

- для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1275 руб.,
- для учебных заведений и студентов – 480 руб.,
- для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1380 руб.,
- для подписчиков зарубежных стран – 33 у.е.

НДС не облагается по ст. 145 НК РФ

По вопросам подписки обращайтесь к Алле Евгеньевне Тимофеевой
Тел./факс: (495) 918–1627
E-mail: kp@vniikp.ru, alla_timofeeva_60@mail.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427
КПП 772201001
р/с: 40702810238120102932
в Московском банке
ПАО «Сбербанк», г. Москва
к/с: 30101810400000000225
БИК 044525225

Подписной индекс в каталогах агентств «Роспечать» и «Урал-Пресс» – **79943**