

УДК 621.318.3:538.945

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ВТСП ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ БЕЗ МЕДНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПРИ 77 И 4,2 К

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

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования зависимости токонесущей способности двух образцов из 12-миллиметровой одиночной YBCO-ленты без медного покрытия и паяного пакета из пяти таких лент от скорости нарастания тока до 350 кА/с. Для образцов, изготовленных в виде колец со спаями, использовался трансформаторный способ ввода тока. Эксперименты, проведенные при 77 К, показали, что достигаемые в образцах токи теплового равновесия с хладагентом очень слабо зависят от скорости изменения тока и близки к критическим. При 4,2 К в образцах было обнаружено появление одиночных механических дефектов сверхпроводящего слоя с значительным снижением локального критического тока. Вводы тока с разными скоростями сопровождалась локальными переходами в нормальное состояние, вызванными джоулевым нагревом серебряного покрытия при обходе током дефекта с сопротивлением около 1 мкОм при 4,2 К. Повторные измерения при 77 К показали, что сопротивление этих дефектов возросло до 4 мкОм. Это сопротивление определяло достигаемые токи при малых напряжениях индукции в образцах (малых скоростях ввода тока). Однако при переходе через 200 кА/с достигаемые токи при повторных измерениях при 77 К практически сравнялись с токами первых измерений при 77 К до появления дефектов в образцах в жидком гелии.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники второго поколения, ВТСП-2-ленты, критический ток, скорость ввода тока.

DYNAMIC MODES OF CURRENT CARRYING ELEMENTS MADE OF REBCO TAPES WITH NO COPPER STABILIZER AT 77 AND 4.2 K

A.A. Ilin, I.A. Kovalev, S.L. Kruglov, A.V. Poliakov, D.I. Shutova, V.I. Shcherbakov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The results of the experimental study of the current carrying capacity for two high temperature superconducting samples made of either one 12 mm bare REBCO tape or a 5-folded soft-soldered stack of such tapes at current ramp rates up to 350 kA/s are presented. The ring-samples with joints were charged in the external changing magnetic field. Experiments conducted at 77 K showed that the maximal currents corresponded to the thermal equilibrium with the coolant are weakly affected by the current ramp rate and are very close to the critical ones. At 4.2 K origination of local mechanical defects in the HTS tapes superconducting layers accompanied with the considerable decreasing of the critical current of the samples was observed. Charging of the samples at different ramp rates led to local quenches caused by Joule heating generated in the silver layer of the tape carrying the bypassing current in the vicinity of the defect with resistance of about 1 μOhm at 4.2 K. Re-examination experiments repeated at 77 K showed the local defects resistance increasing up to 4 μOhm . This resistance determined the maximal achieved currents at low inductance voltages across the samples (at low ramp rates). However, at ramp rates higher than 200 kA/s the maximal currents induced in the samples during the re-examination at 77 K appeared to be almost equal to those, firstly measured in the 77 K experiments conducted before the defects origination in liquid helium.

Key words: 2nd generation high temperature superconductors, REBCO tapes, critical current, current ramp rate.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-4-66-74

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературные сверхпроводники второго поколения (ВТСП-2) используются при создании тоководов 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-2-лент, пропаянных по всей длине для обеспечения механической и тепловой стабильности [1, 2]. В этой работе мы исследовали токонесущую способность ленточных ВТСП-2-проводников Super Power SF12100 [3] без медного покрытия в зависимости от скорости ввода тока при 77, 4,2 К и повторно при 77 К. Результаты сравнительных экспериментов представлены в настоящей статье.

ОБРАЗЦЫ

Для ввода тока в одиночные и многоленточные пакеты ВСП-2-лент трансформаторным способом были изготовлены экспериментальные образцы в виде замкнутых колец диаметром 95 мм (рис. 1). Параметры изготовленных образцов сведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики экспериментальных образцов

Образец	Количество лент	Размеры поперечного сечения, мм ²	Вид образца
s1	5	(12×0,6)	Кольцо из пяти спаянных лент
s2	1	(12×0,1)	Кольцо из одной ленты со спаев
s3	5	(12×0,7)	Одинарная галета из пяти изолированных витков с разомкнутыми концами (контрольные образцы)

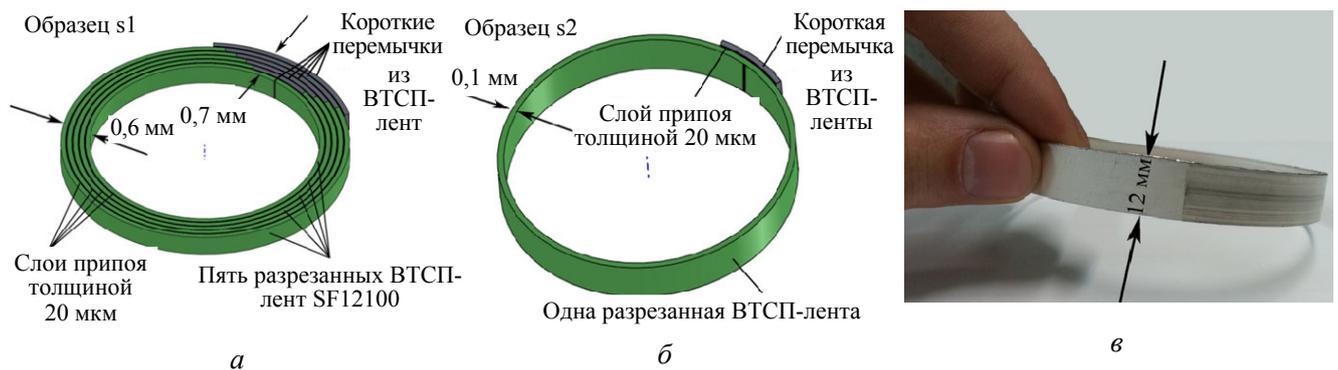


Рис. 1. Экспериментальные образцы: *а* — s1 (пять лент); *б* — образец s2 (одна лента); *в* — фото готового образца s1

В одноленточном образце s2 концы отрезка ленты соединялись стык в стык. Затем на место соединения через слой припоя ПОСК 20 мкм (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 токовыводов ускорителей. Геометрия разрезанных пяти ВТСП-колец с перемычками разной длины 30—150 мм и фотография готового образца s1 показаны на рис. 1, *а*, *б*. Кроме этого, был изготовлен контрольный образец s3, состоящий из пяти изолированных полиимидной плёнкой витков 12×0,7 мм с разомкнутыми концами (без спаев). Он предназначался для наблюдения за тем, как термоциклирование повлияет на критические свойства сверхпроводников.

ЭКСПЕРИМЕНТ В ЖИДКОМ АЗОТЕ

На рис. 2 показаны 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 с внутренним диаметром 102, высотой 250 мм и индуктивностью $L = 0,83$ Гн содержала 4290 витков NbTi композитного сверхпроводника диаметром 0,85 мм.

В замкнутые кольца образцов s1 и s2, 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 спаев.

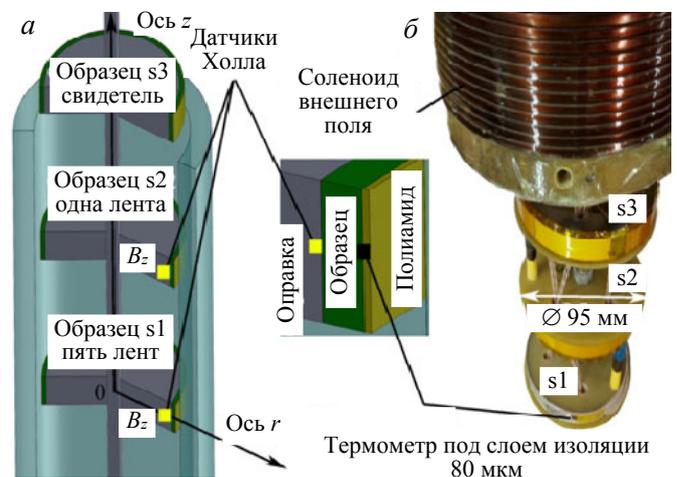


Рис. 2. Поперечное сечение (*а*) и фотография экспериментальной установки с образцами (*б*)

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:

Сопротивление при 77 К, Ом . . .	12,7
Ёмкость, мФ . . .	1,18
Индуктивность соленоида, Гн . . .	0,83
Характерное время разряда, с . . .	0,13
Максимальное напряжение, В . . .	400
Максимальная скорость роста поля, Тл/с . . .	8
Коэффициент поле/ток в центре соленоида, мТл/А . . .	19,23
Частота колебаний, Гц . . .	5
Индуктивность образцов s1 и s2, мкГн . . .	0,175
Коэффициенты взаимной индукции с соленоидом внешнего поля, мГн:	
s1 . . .	0,129
s2 . . .	0,127

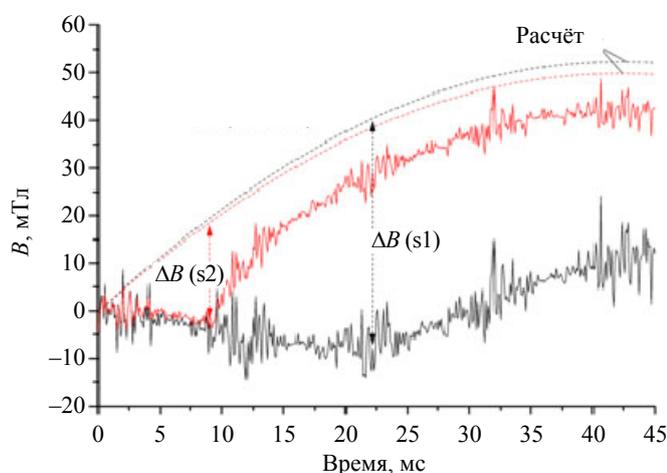


Рис. 3. Зависимость от времени внутреннего (эксперимент) и внешнего (расчёт) магнитных полей образцов s1 (—, пять лент) и s2 (—, одна лента) при разряде конденсатора на соленоид внешнего поля $U = 100$ В ($dB/dt = 2$ Тл/с) в жидком азоте, $T = 77$ К

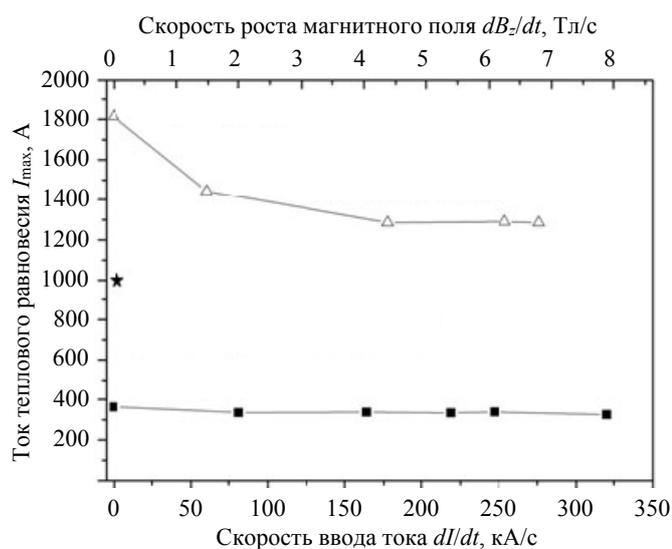


Рис. 4. Экспериментальные зависимости тока теплового равновесия для образцов s1 (Δ, пять спаянных лент SuperPower SF12100) и s2 (■, одна лента SuperPower SF12100) от скорости ввода тока, $T = 77$ К; ★ — рабочая точка тоководов на 18 кА для NICA в динамическом режиме

Временная зависимость внутреннего (эксперимент) и внешнего (расчёт) магнитных полей для образцов s1 (пять лент) и s2 (одна лента) в жидком азоте на примере разряда батареи конденсаторов напряжением 100 В ($dB/dt = 2$ Тл/с) показана на рис. 3. При оцифровке 10 кГц сигналы приведены с шумами, чтобы математическая обработка не искажала физическую картину. 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 этого тока определялась по разнице величины расчётного внешнего поля и фиксируемого датчиком Холла внутреннего поля ΔB образцов s1 и s2. Значение скорости ввода тока в образец определялось как максимальный экранирующий ток, делённый на время его достижения от начала процесса разряда. Максимально достигнутые в наших экспериментах токи также можно определить как ток тепловой устойчивости, который определяется тепловым равновесием между генерацией тепла в сверхпроводящей ленте и теплосъёмом в хладагент [4].

Результаты серии экспериментов с разными скоростями наведения тока в образцах представлены 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%.

На рис. 4 показаны экспериментальные зависимости тока теплового равновесия для образцов s1 (пять лент) и s2 (одна лента) от скорости ввода

тока. На верхней оси графика показана скорость изменения внешнего осевого магнитного поля dB_z/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 до 1285 А). Ток образца из одиночной ленты s1 снизился незначительно, примерно на ~10%: I_{\max} (1 кА/с) = 363 А и I_{\max} (320 кА/с) = 325 А. Также на рис. 4 для сравнения показана рабочая точка динамического режима ВТСП-тоководов коллайдера НИКА [5]. Видно, что единичный пакет из пяти спаянных ВТСП-2-лент обладает большим запасом тепловой устойчивости в режиме работы реального устройства.

ЭКСПЕРИМЕНТ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

Методика экспериментов в жидком гелии заключалась в следующем. В сверхпроводящий соленоид внешнего поля вводился ток с различными скоростями от 1 до 80 А/с (до $dB/dt = 1,6$ Тл/с), при этом с помощью датчиков Холла фиксировались внутренние магнитные поля образцов s1, s2, а также температура внешней поверхности образца s1 (угольный термометр был установлен на противоположной спаям стороне образца s1).

На рис. 5 для образца s1 показаны экспериментальные временные диаграммы внутреннего поля при скорости ввода тока в соленоид 10 А/с (0,2 Тл/с) на фоне расчётного магнитного поля внешнего соленоида. Хорошо видны периоды экранирования образцом s1 внешнего поля (B_e). Окончание периода экранирования означает переход образца в нормальное состояние и затухание экранирующего тока на локальной нормальной зоне, а затем возврат экранирующего тока в сверхпроводник. Причём термометр показывал слабую реакцию из-за временной задержки на тепловую диффузию от «горячего пятна» нормальной зоны.

На рис. 6 показаны результаты испытаний образцов в жидком гелии в виде зависимостей тока перехода (максимальный экранирующий ток), который можно трактовать также как ток теплового срыва, от скорости ввода тока. Исключением из зависимости являются первые точки слева с самым низким значением скорости ввода тока в образцы (≤ 1 кА/с). При такой скорости ввода тока переход отсутствовал, и после набора образцами максимального экранирующего тока устанавливалось тепловое равновесие, принципиально подобное поведению образцов в жидком азоте.

Рис. 6 демонстрирует необычный вид возрастающих зависимостей тока перехода образцов с ростом скорости ввода тока при огромной деградации относительно их критического тока при 4,2 К (>50%). Кроме того, на зависимостях $I_q(dI/dt)$ образцов явно присутствуют точки перегиба, разделяющие высокий начальный темп набора тока перехода с увеличением скорости ввода, и последующий, существенно более пологий ход кривой. Точки перегиба зависимостей $I_q(dI/dt)$ означают появление в образцах активных электрических сопротивлений, по-видимому, вызванных актами расслаивания или трещинообразования в сверхпроводящем слое 1 мкм керамики YBCO. Активное

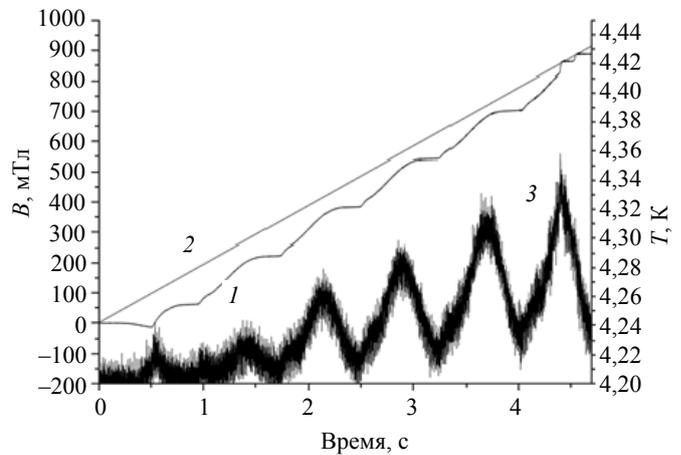


Рис. 5. Временные диаграммы внутреннего B_i (1) (эксперимент), внешнего B_e (2) (расчёт) магнитных полей и температуры T (3) поверхности образца s1 (пять лент) при вводе тока в соленоид внешнего поля со скоростью 10 А/с ($dB/dt = 0,2$ Тл/с) при 4,2 К

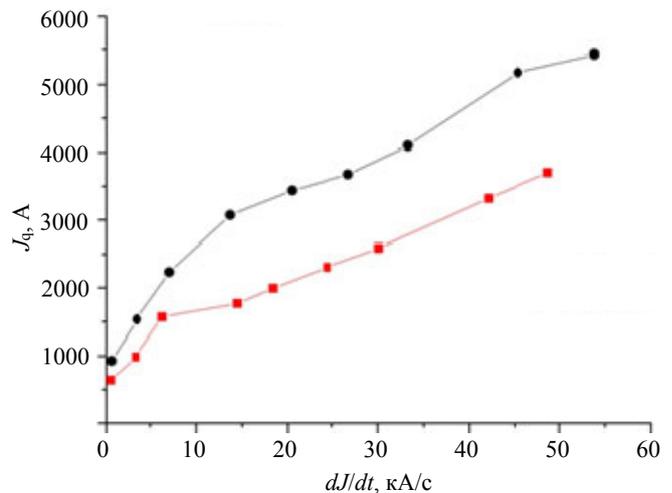


Рис. 6. Зависимость тока теплового срыва от скорости ввода тока при 4,2 К для образца s1 (●, пять лент в пересчёте на одну ленту) и образца s2 (■, одна лента)

электрическое напряжение (далее напряжение) в образце в моменты переходов в жидком гелии можно вычислить из разности ЭДС индукции, задаваемой в образце при вводе тока в соленоид (первичная обмотка) и индуктивного напряжения в образце (вторичная обмотка), определяемого экспериментально через скорость набора экранирующего тока до момента перехода.

На рис. 7 показаны зависимости напряжения в образцах от максимального экранирующего тока при переходах, за исключением первых точек слева, когда переходов не было. Там же обозначены сопротивления на линейных участках, где справедлив закон Ома ($R_q = dU_q/dI$). На зависимостях явно прослеживаются две области с существенно разными величинами сопротивлений. Низкие значения сопротивлений в левых частях графиков можно трактовать как сопротивления спаев образцов (R_j). При низких ЭДС индукции в образцах-кольцах (низкие скорости ввода тока в соленоид) спаи, а их два: вход тока из разрезанной ленты в перемычку и выход из неё в ленту (см. рис. 1) определяют максимальный экранирующий ток. Затем при большей скорости при определённом значении тока происходит акт расслаивания или растрескивания с выделением тепла непосредственно в сверхпроводящем слое и внезапным переходом образца в нормальное состояние. В образце появляется дефект с локальным, существенно более низким значением критического тока.

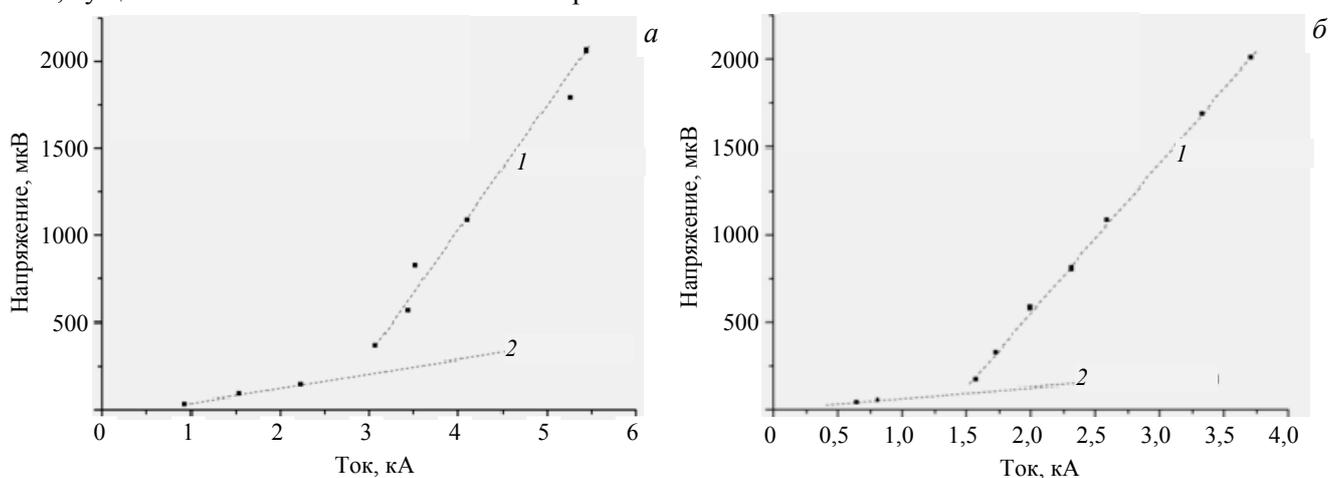


Рис. 7. Зависимость активного электрического напряжения в образцах от максимального экранирующего тока при переходе в нормальное состояние, $T = 4,2$ К: *а* — образец *s1* (пять спаянных лент без меди SP ($12 \times 0,6$)), I — $R_q = 720 \pm 120$ нОм, 2 — $R_j = 84$ нОм); *б* — образец *s2* (одна лента, без меди SP ($12 \times 0,1$)), I — $R_q = 890 \pm 30$ нОм, 2 — $R_j = 60-65$ нОм)

На рис. 8 показаны совмещённые временные диаграммы внутреннего магнитного поля (показания датчиков Холла) образца *s1* (пять лент SP) при первых трёх вводах тока в соленоид внешнего поля при 4,2 К со

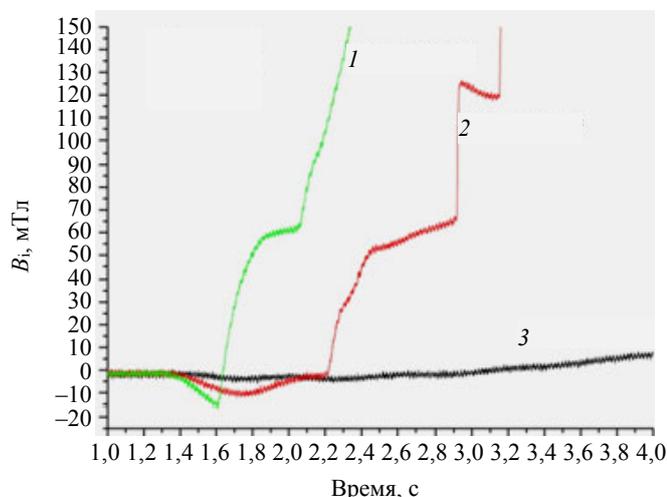


Рис. 8. Временные диаграммы внутреннего магнитного поля образца *s1* (пять лент SP) при первых трёх вводах тока в соленоид внешнего поля при 4,2 К со скоростями 10 А/с (0,2 Тл/с) (1), 5 А/с (0,1 Тл/с) (2) и 1 А/с (0,02 Тл/с) (3)

скоростями 1 А/с (0,02 Тл/с), 5 А/с (0,1 Тл/с) и 10 А/с (0,2 Тл/с). При скорости 1 А/с перехода в нормальное состояние нет и виден процесс набора экранирующего тока, максимум которого определяется сопротивлением спая образца кольца. При скорости 5 А/с (второй ввод тока) при выходе поля образца на нулевую отметку процесс набора экранирующего тока практически закончен и внутреннее поле образца должно начать следовать за внешним с разницей на экранирование, но происходит внезапный переход в нормальное состояние, по-видимому, связанный с актом механического повреждения сверхпроводящего слоя. В дальнейшем все переходы подобны переходу при третьем вводе тока в соленоид при 10 А/с (0,2 Тл/с): набор экранирующего тока, сопровождающийся ростом температуры места повреждения и тепловым срывом с нагревом до критической температуры.

Появление сопротивления, значительно превышающего сопротивление спаев, означает, что ток в образце обходит появившийся дефект по серебряному покрытию ленты. Длину l повреждения можно оценить, приравняв установившуюся величину активного сопротивления к сопротивлению серебряного покрытия на этом участке. Оценки показывают, что, например, при 4,2 К с реальным RRR серебряного покрытия, равным 25, у образцов s1 и s2 длины обхода дефекта равны $l_{s1} = 51$ мкм и $l_{s2} = 63$ мкм. Небольшую разницу можно объяснить тем, что в образце s1 (пять лент SP) малая часть тока уходит в другие ленты через большие поперечные переходные электрические сопротивления. Постоянство и близость значений этих активных электрических сопротивлений у s1 и s2 говорит об одинаковом механизме повреждения сверхпроводящего слоя. Для образцов s1 и s2 общей особенностью является перемычка спая.

Причиной переходов, по всей вероятности, были акты расслаивания или трещинообразования в сверхпроводящем слое перемычки спая образца s2 (SP) и последней перемычки спая пятого витка-кольца у образца s1 (см. рис. 1). Это утверждение основано на том факте, что при экранировании внешнего увеличивающегося магнитного поля в образце s1 экранирующий ток сначала заполняет сечение внешнего по радиусу кольца и затем по мере приближения к критической плотности тока продвигается к внутреннему кольцу (модель критического состояния). О том же месте появления дефекта в образце s2 говорит равенство установившихся активных электрических сопротивлений обхода током дефекта по серебряной матрице в динамическом режиме быстрого ввода тока. Причиной появления самого механического дефекта в сверхпроводящем ВТСП-2-слое перемычки спая в образцах служит взаимодействие между сжимающими тонкий слой силами в осевом направлении (силы Ампера от взаимодействия экранирующего тока и собственного радиального магнитного поля), прижимающими к оправке силами в радиальном направлении (взаимодействие экранирующего тока и внешнего поля) и растягивающими силами в тангенциальном направлении из-за нагрева перемычки джоулевым теплом от двух спаев. Причём первые две силы приложены к тончайшему сверхпроводящему слою, а третья — ко всему сечению ленты [6, 7].

Последующие переходы образцов уже вызваны нагревом места дефекта до критической температуры. Оценки показывают, что, например, для образца s2 критические перегревы (ΔT_{cs}) составляют 64 К для тока перехода 807 А (0,6 кА/с) и 26 К для тока перехода 3704 А (49 кА/с). 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 Вт/(м²·К).

ПОВТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ЖИДКОМ АЗОТЕ

Появление механических дефектов и активных электрических сопротивлений обхода током дефекта по серебряной матрице в динамическом режиме в образцах при охлаждении до 4,2 К (испытания в жидком гелии) и необычный характер зависимости тока теплового срыва от скорости ввода тока (вместо спадающей зависимости практически линейно возрастающая зависимость, подобная закону Ома) привели нас к мысли о проведении повторных испытаний в жидком азоте. На рис. 9 показаны результаты повторных измерений после испытаний в жидком гелии, а также результаты первичных измерений до ис-

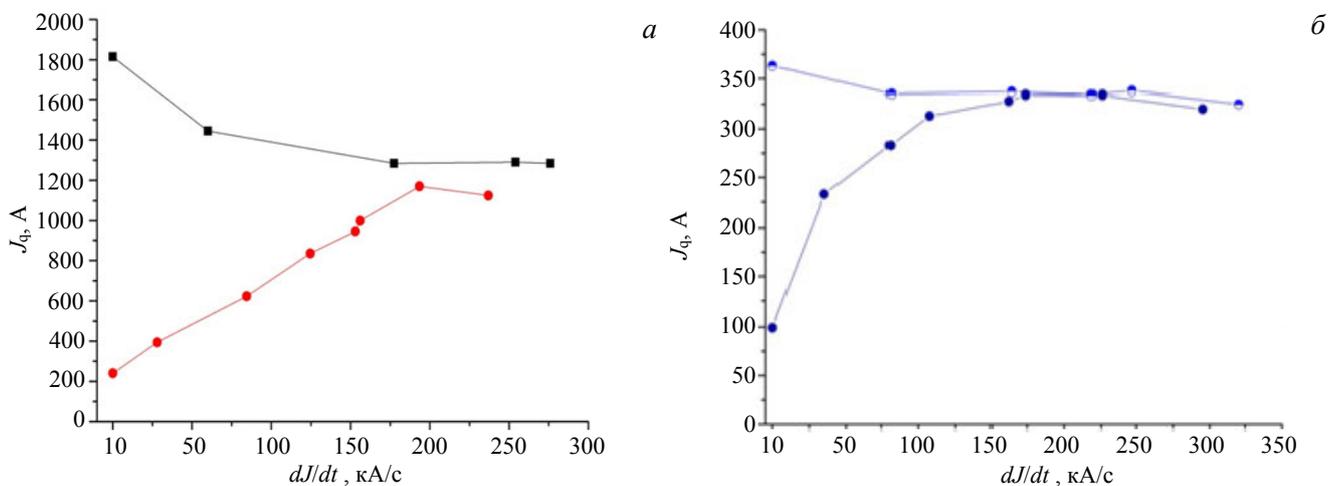


Рис. 9. Зависимость максимального экранирующего тока теплового равновесия от скорости ввода тока в жидком азоте до и после испытаний в жидком гелии: а — образец s1, пять лент SP, 77 К перед 4,2 К (■), после 4,2 К (●); б — s2, одна лента SP, 77 К перед 4,2 К (◐), после 4,2 К (●)

пытаний в жидком гелии. При повторных испытаниях так же, как и при первичных, не наблюдалось переходов в нормальное состояние и максимальный экранирующий ток являлся током теплового равновесия с хладагентом.

На рис. 9 видно, что при повторных измерениях существуют две похожие области кривых для трёх образцов. В левых областях графиков до определённого уровня индуктивного напряжения, задающего скорость ввода экранирующего тока, зависимости практически линейные. В правых областях графиков зависимость медленно спадающая, практически совпадающая с кривыми первоначальных измерений в жидком азоте. Ясно, что в первой области работает закон Ома и ток теплового равновесия (максимальный экранирующий ток) ограничивается сопротивлением обхода дефекта в динамическом режиме, тогда как во второй области ток теплового равновесия определяется критическими свойствами образцов.

Интересным является вопрос о соотношении сопротивлений обхода током механического дефекта сверхпроводящего слоя через серебряную матрицу в жидком гелии и в жидком азоте (вторые испытания после гелия). В табл. 2 приведены значения этих сопротивлений и их отношений.

Т а б л и ц а 2. Активные электрические сопротивления образцов s1 и s2 по достижении максимального экранирующего тока при температурах 4,2 и 77 К (повторные испытания) и их отношения

Образец	R_q (4,2 К), мкОм	R_q (77 К), мкОм	R_q (77 К)/ R_q (4,2 К)
s1 (пять лент)	$0,72 \pm 0,12$	$2,8 \pm 0,8$	$3,9 \pm 1,3$
s2 (одна лента)	$0,89 \pm 0,03$	$4,0 \pm 0,9$	$4,5 \pm 1,0$

Если вычислить длину участка обхода током в жидком азоте, получаются следующие значения: $l_{s1}(77 \text{ К}) = 47 \pm 13$ мкм, а $l_{s2}(77 \text{ К}) = 68 \pm 15$ мкм. Практически в пределах ошибок эти значения совпадают с длинами обтекания в жидком гелии.

ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЕЗАННЫХ ОБРАЗЦОВ

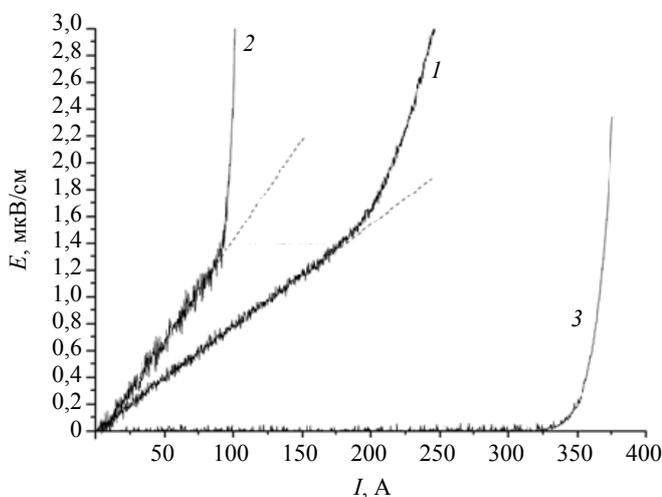


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики разрезанных образцов-колец s1 (пять лент SP, $J_c = 240$ А, $R = 115$ нОм) (1), s2 (одна лента SP, $J_c = 99$ А, $R = 127$ нОм) (2) и образца-свидетеля s3 (одна лента SP, $J_c = 363$ А) (3) в жидком азоте после испытаний в жидком гелии, $T = 77$ (после 4,2 К)

48 А на одну ленту у образца s1 и до 99 А у образца s2. При сравнении с рис. 6 видно, насколько различны ток теплового равновесия в динамическом режиме и критический ток по критерию 1 мкВ/см у образца s2 с дефектом: 325 А при 320 кА/с и 99 А при 1 А/с.

Важным является вопрос, насколько механический дефект сверхпроводящего слоя ленты ВТСП-2 является критическим, т.е. какова потеря критического тока. Чтобы сравнить критические токи образцов с дефектами s1 и s2 с критическим током образца-свидетеля s3 (пять лент), образцы с дефектами были разрезаны и с них сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ). Эти характеристики представлены на рис. 10.

Необходимо подчеркнуть, что образец-свидетель термоциклов s3 подтвердил свой критический ток 363 А. ВАХ образцов s1 и s2 наложены на линейный рост электрического поля с увеличением тока, определяемый по закону Ома сопротивлением спаев образцов. По сравнению с $T = 4,2$ К при 77 К они в 1,4—2 раза больше.

На рис. 10 видно резкое снижение критического тока от 363 А (у образца-свидетеля s3) до

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована токнесущая способность ВТСП-лент второго поколения SF12100 в экстремальных динамических режимах при температуре жидкого азота и жидкого гелия. 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 350 кА/с.

Сравнительные эксперименты в жидком азоте подтвердили высокую тепловую стабильность ВТСП-2-лент как в одноленточных образцах, так и в паяных пачках из пяти лент при скоростях изменения внешнего магнитного поля вплоть до 8 Тл/с. Измеренное падение токов теплового равновесия составило 10% для образцов из одиночной ленты (I_{CS2} (1 А/с) = 363 А и I_{QS2} (321 кА/с) = 325 А) и 30% для образцов из пяти пропаянных лент (I_{CS1} (1 А/с) = 1815 А и I_{QS1} (280 кА/с) = 1285 А).

При испытаниях в жидком гелии у обоих образцов обнаружено появление единичного механического дефекта сверхпроводящего слоя. При этом зафиксировано значительное снижение критического тока от 3,7 раза у s2 (одна лента) до 7,6 раза у s1 (пять лент) по сравнению с током короткого образца. Установившееся активное электрическое сопротивление обхода током дефекта по серебряной матрице составило у обоих образцов ~1 мкОм при 4,2 К и ~4 мкОм при 77 К. Джоулево тепловыделение на этом сопротивлении приводило к локальным перегревам в жидком гелии, тепловым срывам и преждевременным переходам в нормальное состояние.

Повторные испытания образцов с механическими дефектами в жидком азоте после жидкого гелия показали, что при низких ЭДС индукции ток теплового равновесия (без переходов в нормальное состояние он является максимальным экранирующим током) сначала определяется активным электрическим сопротивлением обхода дефекта в динамическом режиме. При больших ЭДС (большие скорости ввода тока ~200 кА/с) достигнутые токи уже определяются критическими свойствами образцов и токи теплового равновесия для 77 К до и после 4,2 К практически начинают совпадать, несмотря на наличие дефекта.

Полученные результаты могут оказаться полезны при проектировании быстроциклирующих сильноточных сверхпроводниковых устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heller R., Fietz W.H., Gröner F., Heiduk M., Hollik M., C. Lange, Lietzow R. 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. Kovalev I.A., Surin M.I., Naumov A.V., Novikov M.S., Novikov S.I., Ilin A., Polyakov A.V., Scherbakov V.I., D.I. Shutova. Test results of 12.8 kA ReBCO coated conductor current leads. — Cryogenics, 2017, vol. 85, p. 71—7.
3. <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>.
4. Rakhmanov A.L., Vysotsky V.S., Ylyin Yu.A., Kiss T., Takeo M. Universal scaling law for quench development in HTSC devices. — Cryogenics, 2000, vol. 40 (1), p. 19—27.
5. Kovalev I.A., Surin M.I., Naumov A.V., Novikov M.S., Novikov S.I., Ilin A.A., Polyakov A.V., Scherbakov V.I., D.I. Shutova. HTS current leads for the NICA accelerator complex. — Cryogenics, 2018, vol. 94, p. 45—55.
6. Yanagisawa Y., Nakagome H., Takematsu T., Takao T., Sato N., Takahashi M., Maeda H. Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance. — Physica C: Superconductivity and its Applications, 2011, vol. 471 (15—16), p. 480—485.
7. Liu L., Zhu Y., Yang X., Qiu T., Zhao Y. Delamination properties of YBCO tapes under shear stress along the width direction. — IEEE Trans. Appl. Supercond, 2016, vol. 26 (6), p. 6603406.



Алексей Андреевич Ильин, ведущий инженер, Отделение сверхпроводимости; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
fr1st@mail.ru



Иван Алексеевич Ковалев, в.н.с., к.техн.н., Отделение сверхпроводимости; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
kovalev_ia@nrcki.ru



Сергей Леонидович Круглов, в.н.с., д. техн. н., Отделение сверхпроводимости; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
kruglov-sl@yandex.ru



Алексей Вячеславович Поляков, м.н.с., Отделение сверхпроводимости; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
alxadress@gmail.com



Дарья Игоревна Шутова, н.с., к.ф.м.н., Отделение сверхпроводимости; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
shutovadi@mail.ru



Владимир Игоревич Щербаков, главный специалист, Отделение сверхпроводимости; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
v0v04ka@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.
После доработки 29 июня 2020 г.
Принята к публикации 24 сентября 2020 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 66—74.