

Изготовление и экспериментальное исследование гибких геликоидальных сильноточных высокотемпературных сверхпроводниковых элементов

КЕЙЛИН В.Е., НОВИКОВ М.С., НОВИКОВ С.И.

Различные высокотемпературные сверхпроводниковые (ВТСП) устройства (трансформаторы, электромашинны, магниты ускорителей, силовые кабели, токоподводы и т.д.) нуждаются в токонесущих элементах с рабочими токами, многократно превышающими максимальные токи ВТСП лент. Токонесущие элементы могут быть изготовлены из многих ВТСП лент 2-го поколения, намотанных геликоидально на круглые гибкие формеры диаметром несколько миллиметров в несколько слоев из нескольких лент. Такие гибкие токонесущие элементы при высоких значениях рабочих токов имеют малые потери в переменных полях и на переменном токе. Исследования электрических и механических свойств ВТСП лент различных производителей показали возможность изготовления токонесущих элементов такой конструкции. Изготовлены образцы токонесущих элементов из ВТСП лент (до 16), геликоидально намотанных на гибкие формеры диаметром несколько миллиметров. Формеры туго скручены примерно из 3000 проволок из нержавеющей стали диаметром 0,1 мм. Были получены вольт-амперные характеристики образцов на постоянном токе в поле собственного тока и внешних магнитных полях до 0,6 Тл, а также на переменном токе промышленной частоты в поле собственного тока и внешнем синхронном магнитном поле до 0,6 Тл. Установлено практическое отсутствие деградации токонесущей способности ВТСП лент в процессе изготовления образцов.

Ключевые слова: ВТСП устройства, токонесущие элементы, изготовление, экспериментальная проверка, рекомендации к применению

Конструкция гибких транспонированных сильноточных токонесущих ВТСП элементов для импульсных и переменноточных магнитов и кабелей была предложена van der Laan [1, 2]. Авторы статьи рассмотрели многие детали этой конструкции – ВТСП ленты, формер, технологию намотки и токовые терминалы. Требования к ВТСП лентам, очевидно, следующие: они должны выдерживать геликоидальную намотку на небольшой радиус без деградации; анизотропия токонесущей способности лент во внешнем магнитном поле должна быть минимальной: формер должен обеспечивать механическую стабильность в продольном и поперечном

Current-carrying elements with working currents many times higher than the maximal permissible currents through high-temperature superconducting (HTSC) tapes are needed for constructing various kinds of HTSC devices such as transformers, electrical machines, accelerator magnets, power cables, current leads, etc. The required current-carrying elements can be fabricated of many second-generation HTSC tapes helically wound of a few tapes in a few layers on round flexible formers a few millimeters in diameter. Such flexible current-carrying elements are able to carry high working currents and have small losses when placed in alternating fields and operating on alternating current. Investigations of the electrical and mechanical properties of HTSC tapes produced by different manufacturers have shown the possibility of fabricating current-carrying elements of such design. Samples of current-carrying elements made of several (up to 16) HTSC tapes helically wound on flexible formers a few millimeters in diameter have been fabricated. The formers are tightly twisted of around 3000 stainless steel wires 0.1 mm in diameter. Volt-ampere characteristics of the samples have been obtained on direct current in the field induced by the own current and in external magnetic fields of up to 0.6 T, as well as on alternating current of the power supply frequency in the field of own current and in external synchronous magnetic field of up to 0.6 T. It has been found that there is almost no degradation of the current-carrying capacity of HTSC tapes during fabrication of the samples.

Key words: HTSC devices, current-carrying elements, fabrication, experimental checking, recommendations for use

направлении и гибкость, не увеличивая потерь на переменном токе в токонесущем элементе. В связи с этим были изготовлены формеры из примерно 3000 туго скрученных проволок из нержавеющей стали диаметром 0,1 мм, разработан способ автоматизированной намотки на формер нескольких параллельных лент с индивидуальным натяжением каждой ленты и изготовлено экспериментальное устройство для намотки коротких образцов. Автоматическая раскладка лент и угол рассчитывались исходя из шага транспонирования, ширины и числа лент, зазоров между лентами, диаметра формера.

Таблица 1

Вариант	Производитель, технология	Параметры ВТСП лент			
		Подложка, ВТСП слой	Медное покрытие с каждой стороны, мкм	Ширина (мм)/толщина (мкм)	Ток при 77К, А
А	SuperPower, SCS4050 AP, MOCVD[3]	Хастеллой 50 мкм, (GdZr)BCO	20	4,2~100	95±3%
В	AMSC, MOD [4]	Ni5at%W 100 мкм, YBCO	50	4,5~200	~120
С	SuNAM, RCE [5]	Хастеллой 60 мкм, GdBCO	20	4,2~100	220±4 %

Таблица 2

Вариант	Намотка	Значение тока, А		Примечание
		при 1мкВ/см	при 10 мкВ/см	
А	«ВТСП вниз»	96	104	Прилегает плотно, ровная
	«ВТСП вверх»	15	18	
В		Резистивность от		Седлообразная форма
	«ВТСП вниз»	0	75	
	«ВТСП вверх»	0	0	
С	«ВТСП вниз»	225	238	Слегка седлообразная форма
	«ВТСП вверх»	0	0	

Исследование ВТСП лент. Три вида ВТСП лент различных производителей были предварительно отобраны для исследований с точки зрения их применения в гибких транспонированных токонесущих элементах (см. табл. 1).

Зависимости критического тока ленты А от деформации сжатия и растяжения измерены в перпендикулярном магнитном поле 0,5 Тл при температуре 77 К. Для этого две ленты были припаяны к балке равного сопротивления из нержавеющей стали, которая изгибалась в жидком азоте. Обе ленты при этом испытывают одинаковую по модулю деформацию, одна – сжатия, другая – растяжения. Критический ток ленты А гораздо быстрее снижается при растяжении, чем при сжатии с таким же модулем. В случае намотки лент ВТСП слоем вниз ВТСП слой находится под действием деформации сжатия [1]. Получены вольт-амперные характеристики лент А, В и С, намотанных геликоидально на трубку диаметром 6 мм с шагом около 18 мм.

Деградация токонесущей способности лент А и С, намотанных «ВТСП вниз», меньше, чем неопределенность токонесущей способности (разброс по длине ленты) (см. табл. 1, 2). Ток ленты В, намотанной «ВТСП вниз», при 10 мкВ/см на 50% ниже, чем у прямой ленты, причем вольт-амперная характеристика содержит прямой резистивный участок практически от нуля тока (см. табл. 2). Критический ток ленты А, намотанной «ВТСП вверх», составил всего около 17% тока прямого образца.

Зависимости токонесущей способности лент А и С во внешнем магнитном поле до 0,6 Тл были измерены в жидком азоте при 77 К (рис. 1). Анизотропия зависимостей была исследована в полях 0,1 и 0,5 Тл при 77 К (рис. 2). Критические токи ленты С измерены при 4,2 К в жидком гелии во внешних полях, перпендикулярных оси ленты. Токи ленты С при 1 мкВ/см составляют 550 А в магнитном поле 5 Тл и 250 А в поле 7,7 Тл, параллельном поверхности ленты, 380 А в поле 5 Тл и 180 А в поле 7,7 Тл, перпендикулярном поверхности. Лента SuperPower с улучшенным пиннингом (7,5 % Zr допирование) имеет при 1 мкВ/см значения токов 320 А в поле 5 Тл и ~250 А в поле 7,7 Тл, перпендикулярном поверхности ленты, при 4,2 К [6]. Полевая зависимость критического тока ленты С значительно сильнее, чем ленты А (рис. 1), и существенно более анизотропна (рис. 2). Из-за этого в перпендикулярном магнитном поле, большем 0,6 Тл при 77 К и 6–7 Тл при 4,2 К, токонесущая способность ленты А становится больше, чем у ленты С.

По результатам исследований видно, что лента А пригодна для создания гибкого геликоидального токонесущего элемента любых применений и предпочтительна для устройств с высокими значениями магнитного поля. Лента С также пригодна для такого токонесущего элемента и предпочтительна для применения в устройствах с низкими значениями поля. Ленты с толстой подложкой, такие как В, не пригодны при диаметре формера меньшем, чем, по-видимому, ~12–15 мм, из-за необратимой деградации и искажения формы.

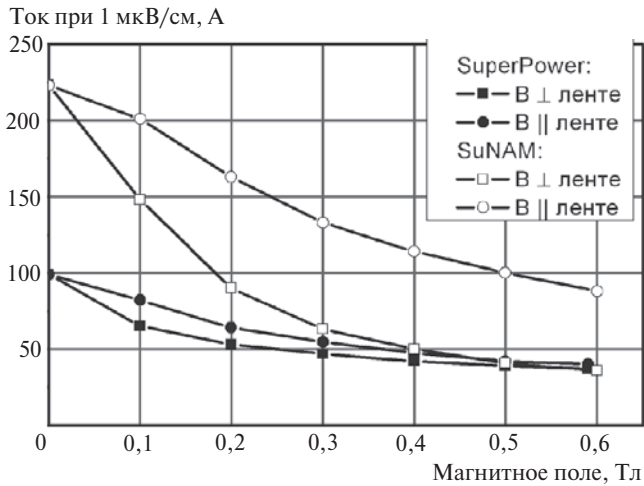


Рис. 1. Зависимость критического тока лент А и С при 77 К во внешнем магнитном поле в плоскости, перпендикулярной оси ленты

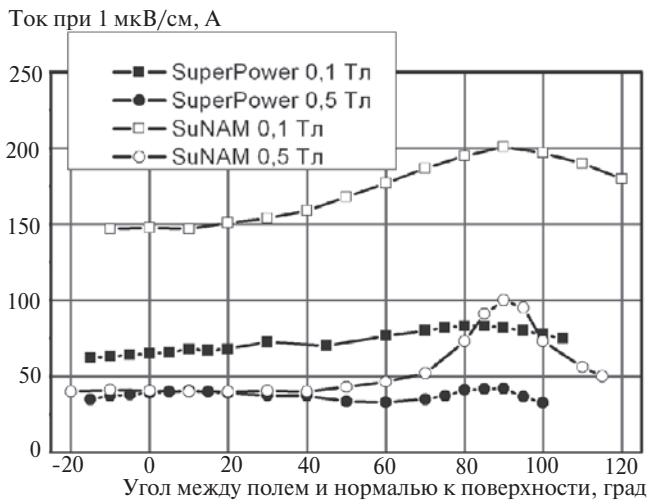


Рис. 2. Анизотропия полевой зависимости критического тока лент А и С во внешних магнитных полях 0,1 и 0,5 Тл в плоскости, перпендикулярной оси ленты, при 77 К; нулевой угол – поле перпендикулярно плоскости ленты

Образцы токонесящего элемента. Два образца токонесящего элемента были изготовлены из ленты А и один – из ленты С (табл. 3). Образец N1 был изготовлен и исследован в 4 этапа.

Токовые терминалы образцов N1 и N2 были изготовлены с использованием медных конусов длиной ~ 50 мм подобно описанному в [2]. Ленты припаяны к конусам спирально с заполнением пустот медной фольгой. Ток в образцы поступает через конусы и дополнительно с внешней стороны лент через гибкие многоволоконные медные кабели. Внешний диаметр токовых терминалов такого типа составляет около 25 мм.

Ленты образца N3 были припаяны непосредственно к формеру (или к 1-му слою лент). Ток поступает только с внешней стороны через гибкие многоволоконные медные кабели отдельно в каждый слой на участках ~30 мм длины. Внешний диаметр таких токовых терминалов составил ~17 мм.

Образцы были изготовлены на намоточном устройстве с вращающимся формером и автоматически позиционируемым отдающим устройством (рис. 3). Натяжение четырех ВТСП лент осуществлялось независимо отдельными регулируемые натяжными устройствами.

Токонесящая способность лент В и С, намотанных «ВТСП вверх», равна нулю (см. табл. 2).

Лента А прилегает к трубке (6 мм) плотно, без щелей. Лента В не прилегает плотно, принимая седлообразную форму, что сделало бы невозможным намотку следующего слоя.

Лента С при намотке на трубку (6 мм) с шагом 18 мм слегка сгибается седлообразно, что не мешает намотке второго слоя, но требует дополнительных исследований механической стабильности токонесящего элемента из этой ленты в обмотке магнита.



Рис. 3. Намотка 2-го слоя образца токонесящего элемента

Таблица 3

Образец	Лента	Параметры образцов					
		Число лент	Число соев	Длина*, мм	Шаг, мм	Угол к формеру, град	Диаметр формера, мм
N1.1	А	4	1	200	23	45	7
N1.1i		4	1(изол)**				
N1.2		8	2				
N1.3		16	4				
N2		16	4	750	36	30	6,5
N3	С	8	2	170	36	30	6,5

* без токовых терминалов;

** 2 слоя 40 мкм каптоновой ленты.

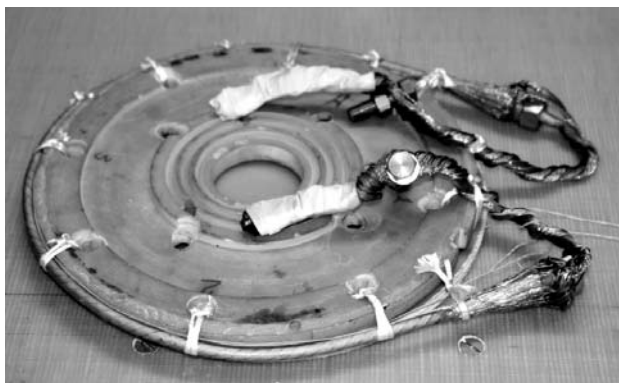
Образец N2 исследовался намотанным на оправку диаметром 290 мм (рис. 4).

Исследования образцов. Токонесущая способность образцов токонесущего элемента на постоянном токе (табл. 4) и транспортные потери на переменном токе (рис. 7) исследованы в жидком азоте при 77 К в поле собственного тока. Потенциальные выводы были припаяны к центральной части (100 мм) образцов, ко всей сверхпроводящей части и к началу токовых терминалов для измерения их сопротивления. Электрическое поле практически одинаково на части в 100 мм и на всей сверхпроводящей части. Транспортные потери вычислялись по вольт-амперным характеристикам на переменном токе. Для этого напряжение образца сначала численно интегрировалось по времени за цикл, чтобы исключить индуктивную составляющую напряжения. Затем результат первого интегрирования численно интегрировался по току, чтобы получить потери энергии за цикл. Потери за цикл умножались на значение частоты.

Были также измерены сопротивления токовых терминалов образцов. Для образца *N1.3* получены значения ~ 0,5 мкОм при 77 К, ~ 0,25 мкОм при 65 К и ~ 0,02 мкОм при 4,2 К. Для образца *N2* сопротивление терминалов составило всего ~ 0,15 мкОм при 77 К из-за отработанной технологии, распределение тока между лентами получилось более однородное. У образца *N3* сопротивление терминалов довольно велико – ~1,5 мкОм при 77 К и ~1 мкОм при 65 К из-за малой длины контактов.

Таблица 4

Образец	Значения токов (77 К), А		Примечание
	при 1 мкВ/см	при 10 мкВ/см	
<i>N1.1</i>	332	415	Перераспределение в <i>N1</i> из-за неоднородных контактов, используется критерий 10 мкВ/см
<i>N1.1i</i>	332	412	
<i>N1.2</i>	523	845	
<i>N1.3</i>	1200	1550	Согнутый на 290 мм И прямой, и согнутый на диаметр 310 мм
<i>N2</i>	1450	1590	
<i>N3</i>	1630	1775	

Рис. 4. Образец *N2* на оправке диаметром 290 мм

Токонесущие способности всех образцов на постоянном токе при 77 К в поле собственного тока (табл. 4) ниже (до 7%), чем значения критических токов лент, умноженные на число лент в образце. Возможные причины этого – неравномерность перераспределения токов между лентами и слоями, неопределенность токонесущей способности лент из-за изменений ее по длине ленты (5–6% для лент А, 7–8% для лент С) и влияние собственного поля.

Распределение собственного поля рассчитано методом конечных элементов в различных моделях токонесущего элемента (рис. 5): геликоидальных с разным числом слоев, числом и шириной лент, с поверхностными и объемными токами, а также плоских с разным числом и расположением лент; расчет проведен в пакете COMSOL. По значению поля и полевой зависимости критического тока лент, при допущении одинаковой токонесущей способности лент и равномерного распределения токов между ними можно оценить уменьшение критического тока токонесущего элемента по сравнению с суммой критических токов лент.

Поля во всех моделях – тангенциальные.

В четырехслойной модели с поверхностными токами поле, перпендикулярное оси, составило около 15, 25, 35 и 45 мТл соответственно для 1-, 2-, 3- и 4-го слоев лент с токами 100 А. Снижение токонесущей способности лент SCS4050 AP в таком внешнем поле (рис. 1) составляет примерно от 2 % во внутреннем до 7% во внешнем слоях. Таким образом, влияние собственного поля объясняет снижение критического тока четырехслойного токонесущего элемента из этой ленты на 4–5% по сравнению с суммарным значением токов лент.

Для двухслойного ТНЭ из 8 лент SuNAM с током по 200 А в ленте значения поля на внутреннем и внешнем ВТСП слоях составляют около 30 и 50 мТл, что может вызвать снижение тока на первом слое (3%) и на втором (5%).

Деформация сжатия ВТСП слоя рассчитана для геликоидальных образцов ВТСП лент на трубке и для лент в образцах токонесущего элемента с использованием подхода, представленного в [1]. Пренебрегая деформацией ВТСП слоя перпендикулярно ленте, считаем, что на критический ток влияет только деформация ВТСП слоя вдоль ленты в направлении тока:

$$\epsilon_{\text{ВТСП}} = (L_n - L_{\text{ВТСП}}) / L_n = \left(\frac{((p(d+2c+t))^2 + p^2)^{1/2} - ((p(d+2c))^2 + p^2)^{1/2}}{((p(d+2c+t))^2 + p^2)^{1/2}} \right), \quad (1)$$

где $\epsilon_{\text{ВТСП}}$ – деформация ВТСП слоя; p – шаг транспонирования; d – диаметр формера; c – толщина слоя меди; t – толщина подложки.

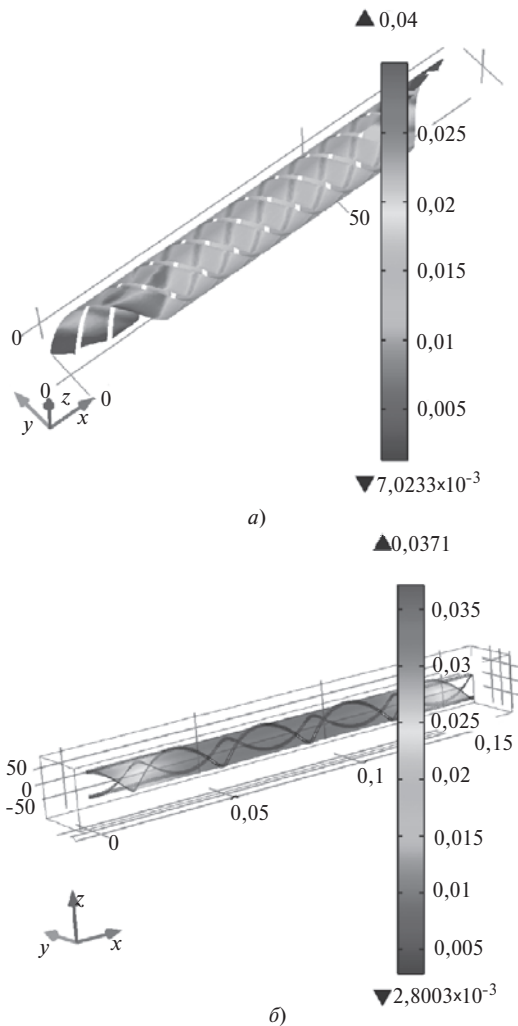


Рис. 5. Примеры расчета распределения поля собственного тока в моделях ТНЭ методом конечных элементов в пакете COMSOL: *a* – объемные токи, 2 слоя лент по 4, поле на ВТСП слое внутренних лент; *b* – поверхностные токи, 4 слоя по 1 широкой ленте (ширина как у 4-х реальных лент), поле на ВТСП слое внешней ленты

Влияние деформации на критический ток рассчитано для лент А и оценено для лент В и С на основе зависимостей критического тока GdBCO и YBCO лент от деформации, измеренных в [1, 2]. Влияние деформации на ленту А рассчитано точно, поскольку лента SuperPower, исследованная в [2], имеет такие же конструкцию и технологию изготовления. Влияние деформации на ток ленты С может быть лишь приблизительно вычислено, поскольку лента SuNAM имеет подобную конструкцию и GdBCO ВТСП слой, но другую технологию производства. Влияние деформации на критический ток ленты В может быть только грубо оценено, потому что YBCO лента AMSC имеет и другую конструкцию, и другую технологию изготовления. Седлообразная форма ленты В в геликоидальном образце может быть причиной значительной поперечной деформации растяжения ВТСП слоя.

Расчетная деградация критического тока лент в образцах токнесущего элемента меньше 1%. Для геликоидальных образцов лент А и С расчетная деградация критического тока составляет величину порядка неопределенности измеренных значений их критических токов. Деградация ленты В по расчетной оценке имеет величину порядка измеренной деградации, принимая во внимание неплотную намотку на трубку, седлообразную форму и резистивность от нуля тока.

Интересно оценить эффективные радиусы изгиба лент в образцах и сравнить их с минимальными радиусами изгиба лент, указанными производителями:

$$r_{\text{эфф}} = -t / 2\epsilon \quad (2)$$

где ϵ – деформация сжатия; t – толщина подложки (табл. 1); $r_{\text{эфф}}$ – эффективный радиус изгиба; r_{min} – минимальный радиус изгиба, указанный производителем (табл. 5).

Равномерность распределения тока между ВТСП лентами определяется на постоянном токе качеством (однородностью) спаев массива ВТСП лент с медными деталями токовых терминалов. Это хорошо проиллюстрировано отличием образца N1.3, более короткого, имеющего неоднородные спаи и большое сопротивление, от образца N2: на уровне 10 мкВ/см их токи практически одинаковы, а на уровне 1 мкВ/см ток образца N1.3 гораздо меньше, поскольку распределение тока между лентами на этом уровне неравномерно. При этом на переменном токе, при котором распределение обусловлено в основном индуктивностями отдельных лент, зависимости транспортных потерь в этих образцах от амплитуды тока одинаковы

Вольт-амперные характеристики образца N1 измерены в жидком азоте при 77 К также во внешнем магнитном поле резистивного магнита с магнитопроводом. Поле магнита горизонтально и сконцентрировано в 140-мм части вертикального образца. Потенциальные выводы припаиваются к центральной части образца (100 мм) и ко всей сверхпроводящей части (200 мм). Электрическое поле на 100- и 200-мм частях, нормированное на длину поля 140 мм, практически одинаково.

Полевая зависимость критического тока образца токнесущего элемента N1.3 измерена в перпендикулярном внешнем магнитном поле, сравнение результата измерений с полевой зависимостью критического тока лент представлено на рис. 6. Такое сравнение делает возможной дальнейшую оценку рабочих токов токнесущего элемента на основе измерений критических токов лент в различных внешних полях, при различных температурах.

Таблица 5

Лента	Образец (диаметр и шаг, мм)	ϵ , %	$I_0/I_c(\epsilon=0)$	$r_{эфф}$, мм	r_{min} , мм
A	6 и 18	-0,435	0,97	5,7	5,5*
B	6 и 18	~0,85	~0,65	~5,8	15
C	6 и 18	-0,52	0,96	5,7	<15
A	N1	-0,326	0,99	7,7	5,5 *
A	N2	-0,188	1	13,3	5,5*a
C	N3	-0,226	1	13,3	<15

* Для намотки как со сжатием, так и с растяжением

Ток при 10 мкВ/см, А

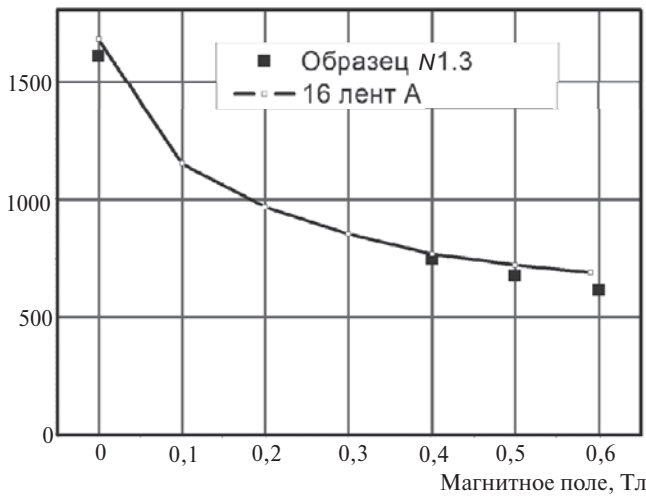


Рис. 6. Полевая зависимость критического тока образца N1.3 (точки) в сравнении с умноженным на 16 средним значением критического тока ВТСП ленты в перпендикулярном внешнем магнитном поле при 77 К

Измерения на переменном токе также выполнены в перпендикулярном внешнем магнитном поле, изменяющемся синхронно с током образца N1.3 (рис. 7). Эксперимент воспроизводит условия, при которых токонесящий элемент находится в обмотке магнита или электромашин. Транспортные потери токонесящих ВТСП элементов являются в основном резистивными. Полевая и температурная зависимости этих транспортных потерь должны подчиняться закону масштабирования, описанному в [7] для кабеля типа ребель. Следовательно, транспортные потери в токонесящем элементе при различных температурах и коэффициентах обмоток могут быть оценены в дальнейшем с использованием результатов этого эксперимента совместно с температурными и полевыми зависимостями критического тока ленты.

Вольт-амперные характеристики образцов N1.1 и N1.1i с изоляцией двумя слоями 40-мкм каптоновой ленты были исследованы на вводе и выводе тока в поле собственного тока в жидком азоте, при

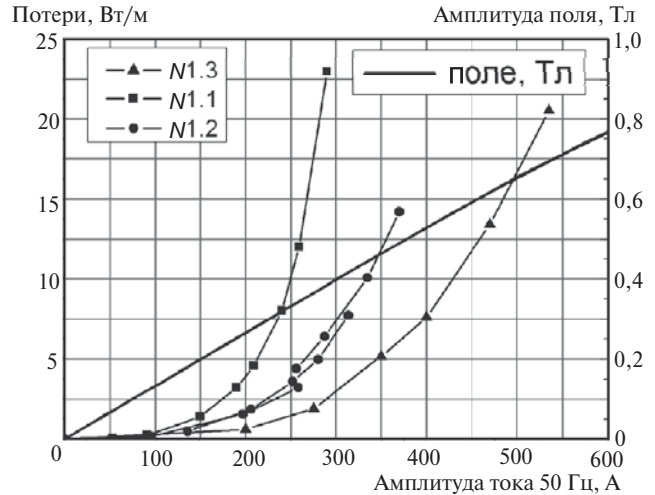


Рис. 7. Транспортные потери на переменном токе образцов токонесящего элемента в перпендикулярном внешнем магнитном поле, изменяющемся синхронно с током, при 77 К

77 К (рис. 8). Токи изолированного и неизолированного образцов до нескольких микровольт на сантиметр одинаковы при вводе. Вольт-амперные характеристики при напряженности электрического поля порядка 10 мкВ/см и выше имеют гистерезис, причина которого – нагрев ВТСП слоя, который в несколько раз больше у изолированного образца, судя по ширине петли гистерезиса.

Образцы N1.1 и N1.1i исследованы также на переменном токе в поле собственного тока и во внешнем поле, изменяющемся синхронно с током, в жидком азоте при 77 К. Зависимость транспортных потерь изолированного образца от амплитуды тока более крутая по сравнению с неизолированным образцом при амплитудах вблизи значений критического тока. Наблюдались тепловые срывы изолированного образца в поле собственного тока при амплитуде тока ~120% критического тока. Они развивались за время примерно 1 с. Тепловые срывы

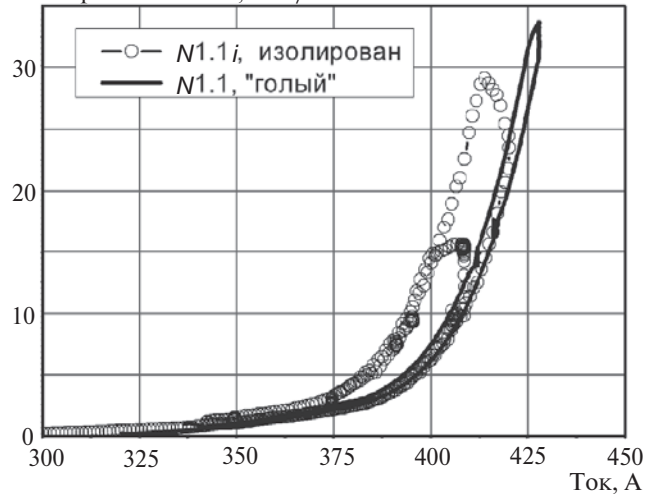


Рис. 8. Сравнение вольт-амперных характеристик неизолированного и изолированного образцов при 77 К в жидком азоте: по ширине гистерезиса можно оценить нагрев и теплообмен с хладагентом

неизолированного образца в жидком азоте при амплитудах тока до 120% критического не наблюдались.

Ток при 65 К в жидком азоте в поле собственного тока составил 3100 А для образца N1.3 и 3050 А для образца N3 при 1 мкВ/см (рис. 9).

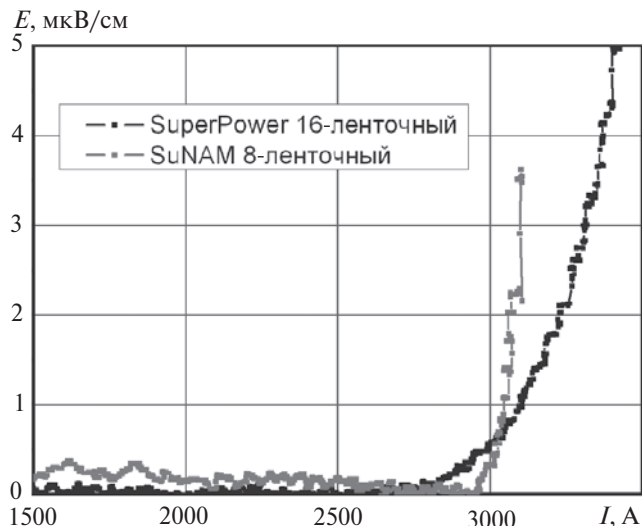


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики образцов N1.3 и N3 в жидком азоте при 65 К в поле собственного тока

Вольт-амперные характеристики образца N1.3 снимались в жидком гелии в поле НТСП магнита с броневым сердечником. Поле горизонтально, его максимальное значение занимает 50 мм высоты образца. Потенциальные выводы припаяны на центральной 100-мм части образца, ко всей 200-мм сверхпроводящей части и к началу токовых терминалов. Напряженность электрического поля, полученная нормированием напряжения на 100- и 200-мм потенциальных выводах на 50 мм, практически одинакова. Вольт-амперная характеристика образца N1.3 (рис. 10) была измерена при 4,2 К в жидком гелии в перпендикулярном внешнем магнитном поле 7,7 Тл (4070 А при 1 мкВ/см и 4200 А при 10 мкВ/см). Такой ток образца соответствует оценке, основанной на полевой зависимости критического тока (Gd7,5%Zr)BCO лент в жидком гелии, представленной в [6].

Таблица 6

Образец	Мощность тепловыделения, Вт/м	Ток, А	Разогрев ВТСП слоя, К	h (3), Вт/м ² К
1 слой без изоляции	1,5	430	~0,15	~10
1 слой изолирован*	1,25	420	~0,5	~2,5
4 слоя без изоляции	5	1640	~0,25	~15

*Изоляция – 2 слоя каптоновой ленты 40 мкм.

Не импрегнированный токонесущий элемент был закреплен только на концах, и магнитное поле

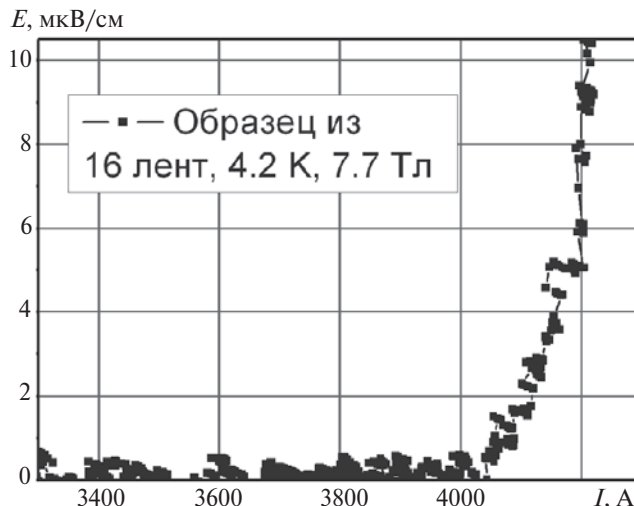


Рис. 10. Вольт-амперная характеристика образца N1.3 в жидком гелии при 4,2 К во внешнем перпендикулярном магнитном поле 7,7 Тл

прижимало его центральную часть к плоской поверхности с силой до 32 кН/м. Электрическое поле без срыва больше 10 мкВ/см свидетельствует о хорошей стабильности. Измерения при 77 К, проведенные после данного эксперимента, не показали какой-либо деградации токонесущей способности образца.

Обсуждение. При постоянном токе и установившейся температуре уравнение теплового баланса можно записать в виде

$$EI = hp(T - T_0), \quad (3)$$

где I – транспортный ток; E – напряженность электрического поля; p – охлаждаемый периметр; T – температура ВТСП слоя; T_0 – температура хладагента; h – коэффициент теплообмена ВТСП слоя с хладагентом.

Разогрев ВТСП ($T - T_0$) оценивается по гистерезису ВАХ и температурной зависимости критического тока. По оценке h (табл. 6) можно сделать следующие выводы: теплоотдача изолированного каптоном образца в несколько раз меньше, чем неизолированного; теплоотдача многослойного образца не меньше, а при наличии зазоров между лентами – больше, чем однослойного. Что касается измерений неизолированного и изолированного образцов на переменном токе, то, видимо, разогрев так велик, что механизм теплопередачи определяется не конвекцией, а кипением и зависимость теплопередачи от нагрева нелинейная; оценить значение h невозможно.

Изгиб образцов исследовался только на диаметр ~300 мм. Максимальную деформацию поверхности токонесущего элемента диаметром d в результате намотки или изгиба на радиус R_w можно оценить как $\epsilon = d / R_w$, т.е. примерно 5%-е удлинение внешней поверхности и сжатие внутренней при намотке

токонесущего элемента 8-мм диаметра на 300-мм оправку. Для того чтобы при этом не было деградации, все ВТСП ленты должны скользить относительно других лент и формера, а между ВТСП лентами должны быть соответствующие зазоры, что и наблюдается на образцах N2 и N3, подвергнутых изгибу и не показавших деградации. В случае пропаянного или проклеенного токонесущего элемента радиус изгиба может быть не менее $\sim 1-2$ м, или же пропайка может быть осуществлена после намотки токонесущего элемента, изготовленного из залуженных лент. Ширина зазоров между лентами шириной w_l одного слоя должна составлять не менее $d_g = w_l d / R_w$, т.е. до 0,64 мм при ширине лент 4 мм для токонесущего элемента диаметром 8 мм, намотанного с радиусом 50 мм. Вообще геликоидальный токонесущий элемент может быть и не круглой, а овальной формы или с плоскими сторонами. Для него справедливы все приведенные здесь выкладки, только за радиус токонесущего элемента следует принимать радиус закругления. Число параллельных ВТСП лент в каждом слое для токонесущего элемента с плоскими сторонами может при тех же углах намотки быть больше, пропорционально периметру формера.

Выводы. 1. GdBaCO и (Gd-Zr)BaCO ленты с толщиной хастеллоевой подложки 50-60 мкм (как ленты А и С) выдерживают геликоидальную намотку на формеры диаметром несколько миллиметров без деградации. Ленты с искусственными центрами пиннинга (как А) предпочтительны для токонесущего элемента при высоких значениях поля, ленты С – при низких значениях поля из-за их высокой токонесущей способности. Ленты с более толстой подложкой (как В) подвергаются необратимой деградации и неприемлемому искажению формы при намотке компактных транспонированных токонесущих элементов.

2. Короткие образцы геликоидального сильно-точного токонесущего элемента намотаны на гибкие формеры из нержавеющей стали диаметром несколько миллиметров с помощью автоматизированного устройства. Образцы 200 и 750 мм были изготовлены из лент А (до 16), образец 170 мм – из 8 лент С.

3. Образцы исследованы в различных магнитных полях с измерением сопротивлений токовых терминалов при температурах 77, 65 и 4,2 К на постоянном и переменном токе. Токи образцов составили более 1,5 кА при 77 К, 3 кА при 65 К в поле собственного тока и 4 кА при 4,2 К в перпен-

дикулярном внешнем поле 7,7 Тл. Вольт-амперные характеристики прямых образцов и образцов, согнутых на диаметр 300 мм, одинаковы. Транспортные потери токонесущего элемента на переменном токе незначительно больше, чем средние потери в ленте, умноженные на эквивалентное число лент. Это объясняется незначительным уменьшением токонесущей способности образцов из-за эффекта собственного поля.

4. Предварительная оценка механической и тепловой стабильности образца позволяет рекомендовать токонесущий элемент данной конструкции для многих применений при различных температурах и условиях охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van der Laan D.C., YBa₂Cu₃O_{7-d} coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications. – Supercond. Sci. Technol., 22(2009)065013(pp5).

2. Van der Laan D.C., Lu X.F. and Goodrich L.F. Compact GdBa₂Cu₃O_{7-d} coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications. – Supercond. Sci. Technol., 24(2011)042001(pp6).

3. <http://www.superpower-ine.com>

4. <http://www.amsc.com>

5. <http://www.i-sunam.com>

6. Selvamannickam V. Research activities in U.S. on coated conductors. – Coated Conductors for Applications, Heidelberg (Germany), 13 –16 November, 2012.

7. Jiang Z., Long N. J., Staines M. et al. The Dependence of Transport AC loss on Temperature and DC Parallel Magnetic Field in an Eight-strand YBCO Roebel Cable, Applied Superconductivity Conference, Portland (OR, USA), 7–12 October 2012.

8. Van der Laan D.C., Noyes P.D., Miller G.E. et al. Characterization of a high-temperature superconducting conductor on round core cables in magnetic fields up to 20 T. – Supercond. Sci. Technol, 26 (2013) 045005 (pp9).

[08.07.13]

Авторы: Кейлин Виктор Ефимович окончил МВТУ им. Баумана в 1957 г. В 1975 г. защитил докторскую диссертацию. Главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

Новиков Михаил Станиславович окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1996 г. Научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт».

Новиков Станислав Иосифович окончил Ленинградский политехнический институт в 1964 г. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование сверхпроводящих проводов в обмотках магнитных систем». Старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт».

токонесущего элемента 8-мм диаметра на 300-мм оправку. Для того чтобы при этом не было деградации, все ВТСП ленты должны скользить относительно других лент и формера, а между ВТСП лентами должны быть соответствующие зазоры, что и наблюдается на образцах N2 и N3, подвергнутых изгибу и не показавших деградации. В случае пропаянного или проклеенного токонесущего элемента радиус изгиба может быть не менее $\sim 1-2$ м, или же пропайка может быть осуществлена после намотки токонесущего элемента, изготовленного из залуженных лент. Ширина зазоров между лентами шириной w_l одного слоя должна составлять не менее $d_g = w_l d / R_w$, т.е. до 0,64 мм при ширине лент 4 мм для токонесущего элемента диаметром 8 мм, намотанного с радиусом 50 мм. Вообще геликоидальный токонесущий элемент может быть и не круглой, а овальной формы или с плоскими сторонами. Для него справедливы все приведенные здесь выкладки, только за радиус токонесущего элемента следует принимать радиус закругления. Число параллельных ВТСП лент в каждом слое для токонесущего элемента с плоскими сторонами может при тех же углах намотки быть больше, пропорционально периметру формера.

Выводы. 1. GdBaCO и (Gd-Zr)BaCO ленты с толщиной хастеллоевой подложки 50-60 мкм (как ленты А и С) выдерживают геликоидальную намотку на формеры диаметром несколько миллиметров без деградации. Ленты с искусственными центрами пиннинга (как А) предпочтительны для токонесущего элемента при высоких значениях поля, ленты С – при низких значениях поля из-за их высокой токонесущей способности. Ленты с более толстой подложкой (как В) подвергаются необратимой деградации и неприемлемому искажению формы при намотке компактных транспонированных токонесущих элементов.

2. Короткие образцы геликоидального сильно-точного токонесущего элемента намотаны на гибкие формеры из нержавеющей стали диаметром несколько миллиметров с помощью автоматизированного устройства. Образцы 200 и 750 мм были изготовлены из лент А (до 16), образец 170 мм – из 8 лент С.

3. Образцы исследованы в различных магнитных полях с измерением сопротивлений токовых терминалов при температурах 77, 65 и 4,2 К на постоянном и переменном токе. Токи образцов составили более 1,5 кА при 77 К, 3 кА при 65 К в поле собственного тока и 4 кА при 4,2 К в перпен-

дикулярном внешнем поле 7,7 Тл. Вольт-амперные характеристики прямых образцов и образцов, согнутых на диаметр 300 мм, одинаковы. Транспортные потери токонесущего элемента на переменном токе незначительно больше, чем средние потери в ленте, умноженные на эквивалентное число лент. Это объясняется незначительным уменьшением токонесущей способности образцов из-за эффекта собственного поля.

4. Предварительная оценка механической и тепловой стабильности образца позволяет рекомендовать токонесущий элемент данной конструкции для многих применений при различных температурах и условиях охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van der Laan D.C., YBa₂Cu₃O_{7-d} coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications. – Supercond. Sci. Technol., 22(2009)065013(pp5).
2. Van der Laan D.C., Lu X.F. and Goodrich L.F. Compact GdBa₂Cu₃O_{7-d} coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications. – Supercond. Sci. Technol., 24(2011)042001(pp6).
3. <http://www.superpower-ine.com>
4. <http://www.amsc.com>
5. <http://www.i-sunam.com>
6. Selvamannickam V. Research activities in U.S. on coated conductors. – Coated Conductors for Applications, Heidelberg (Germany), 13 –16 November, 2012.
7. Jiang Z., Long N. J., Staines M. et al. The Dependence of Transport AC loss on Temperature and DC Parallel Magnetic Field in an Eight-strand YBCO Roebel Cable, Applied Superconductivity Conference, Portland (OR, USA), 7–12 October 2012.
8. Van der Laan D.C., Noyes P.D., Miller G.E. et al. Characterization of a high-temperature superconducting conductor on round core cables in magnetic fields up to 20 T. – Supercond. Sci. Technol, 26 (2013) 045005 (pp9).

[08.07.13]

Авторы: Кейлин Виктор Ефимович окончил МВТУ им. Баумана в 1957 г. В 1975 г. защитил докторскую диссертацию. Главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

Новиков Михаил Станиславович окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики в 1996 г. Научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт».

Новиков Станислав Иосифович окончил Ленинградский политехнический институт в 1964 г. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование сверхпроводящих проводов в обмотках магнитных систем». Старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт».