

УДК 621.318.1: 537.312.62

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПРОВОДА ТИПА CABLE-IN-CONDUIT ДЛЯ КРУПНЫХ МАГНИТОВ

В.Е. Сытников¹, С.А. Лелехов²

¹Научно-технический центр ФСК ЕЭС, Москва, Россия

²Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Статья посвящена вопросам разработки высокоэффективных проводов для создания крупных сверхпроводящих электромагнитных систем (СЭМС), в том числе для СЭМС перспективных термоядерных установок. Одной из основных проблем, которые нужно решить для успешной реализации таких проектов, является создание сильноточных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) проводников для катушек тороидального поля и секций центрального соленоида. Для успешного решения этой проблемы необходимо разработка ВТСП-проводов с высокой конструктивной плотностью тока в сильных магнитных полях вплоть до 20 Тл. При этом в конструкции проводника должно быть достаточно места для размещения стабилизирующего и упрочняющего материалов и каналов охлаждения. Предварительные расчёты показывают, что для различных электромагнитных подсистем термоядерного реактора необходимая конструктивная плотность тока по проводнику колеблется от 30 А/мм² до 50 А/мм². В статье представлен анализ предложенных ранее различных вариантов конструкций сильноточных проводников на основе ВТСП-материалов и предложены принципиально новые, оригинальные конструктивные решения, позволяющие, по мнению авторов, достичь более высоких эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: сверхпроводник, термоядерный реактор, электромагнитная система, конструктивная плотность тока.

NEW HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING CABLE-IN-CONDUIT CONDUCTOR DESIGN FOR LARGE MAGNETS APPLICATION

V.E. Sytnikov¹, S.A. Lelekhov²

¹Science and Technology Center of the Federal Grid Company of United Energy System, Moscow, Russia

²Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

The article is devoted to the development of high-performance high-temperature superconducting (HTS) cable and cable-in-conduit conductor (CICC) design for large magnets application, including magnets for prospective thermonuclear installations. One of the main problem that needs to be solved for the successful implementation of such projects is the creation of high-current HTS conductors for toroidal field coils and central solenoid sections. To solve successfully this problem, it is necessary to develop a HTS conductor with a high engineering current density in strong magnetic fields up to 20 T. There should be enough space in the conductor structure, for the placement of stabilizing and strengthening materials, and for cooling channels. Preliminary calculations show that for various electromagnetic subsystems of a thermonuclear reactor, the required design current density along the conductor ranges from 30 A/mm² to 50 A/mm². The article provides an analysis of the previously proposed various design options for high-current conductors based on HTS materials and proposes new, original design solutions that, according to the authors opinion, allows to achieve higher performance.

Key words: superconductor, fusion reactor, electromagnetic system, engineering current density.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-31-40

ВВЕДЕНИЕ

Предварительные концептуальные проекты магнитов термоядерных установок и иных крупных магнитов предусматривают разработку технических решений для сверхпроводящей электромагнитной системы с использованием ВТСП-проводников. При этом предпочтительной является конструкция типа «кабель в оболочке» (в англоязычной литературе — cable-in-conduit conductors или CICC) в различных вариациях. В ряде случаев предусматривается комбинация в одной установке как обмоток с низкотемпературными (НТСП), так и с ВТСП-проводниками. Конкретный выбор определяется техническими, технологическими и стоимостными характеристиками. Уникальные характеристики ВТСП-материалов позволяют увеличить индукцию магнитного поля в рабочем объёме, уменьшить размер и снизить стоимость установки.

Современные ВТСП-материалы выпускаются в форме тонких лент REBCO и многожильных проволок круглого сечения на основе Bi-2212 с токонесущей способностью несколько сотен ампер в поле ~20 Тл при температуре 4,5 К. В представленной работе предлагается новая конструкция ВТСП-жилы для проводника типа CICC на основе лент REBCO. Рабочие токи крупных магнитных систем составляют

несколько десятков кило-ампер и достигают в некоторых проектируемых системах 100 кА. Таким образом, возникает задача агрегатирования большого количества сверхпроводящих лент в единую токопроводящую систему. При этом следует добиваться равномерного распределения токов между всеми лентами, что не является тривиальной задачей в связи с тем, что омическое сопротивление ВТСП-лент в рабочем режиме равно нулю. Рассмотрены варианты решения задачи создания сильноточных проводов с высокой конструктивной плотностью тока на базе ВТСП-лент второго поколения.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ СИЛЬНОТОЧНЫХ ВТСП-ПРОВОДОВ

В существующих и проектируемых крупных магнитных системах сильноточные провода обеспечивают генерацию магнитных полей с максимальной индукцией магнитного поля на обмотке 5,0—20,0 Тл. При этом рабочие токи могут составлять 5,0—100,0 кА. В таких магнитах на провод действуют значительные механические нагрузки, вызванные силами Лоренца. Кроме того, значительная запасённая энергия в крупных магнитах требует наличия в обмотке элементов, обеспечивающих аварийный вывод энергии при приемлемых напряжениях и нагреве обмотки, не приводящих к повреждению её элементов. Таким образом, в сверхпроводящем сильноточном проводе типа «кабель в оболочке», кроме собственно сверхпроводника, должны присутствовать упрочняющие элементы, стабилизирующий металл (обычно медь или алюминий), электрическая изоляция и каналы для прокачки охлаждающего агента. В настоящее время в литературе описано большое количество сверхпроводящих сильноточных проводов, предназначенных, в первую очередь, для создания магнитов термоядерных установок, которые условно можно разделить на несколько групп [1, 2].

Провода на основе стопок ВТСП-лент [3, 4]. Первичным элементом в таких проводах являются стопки лент, которые либо располагаются в плоскости (рис. 1, а) [5], либо скручиваются вдоль продольной оси (рис. 1, б, в). Далее несколько таких стопок лент собираются в токопроводящую жилу провода, как это показано на рис. 1, г, д. Сильноточные провода обычно заключаются в кожух из нержавеющей стали для обеспечения механической прочности и устойчивости.

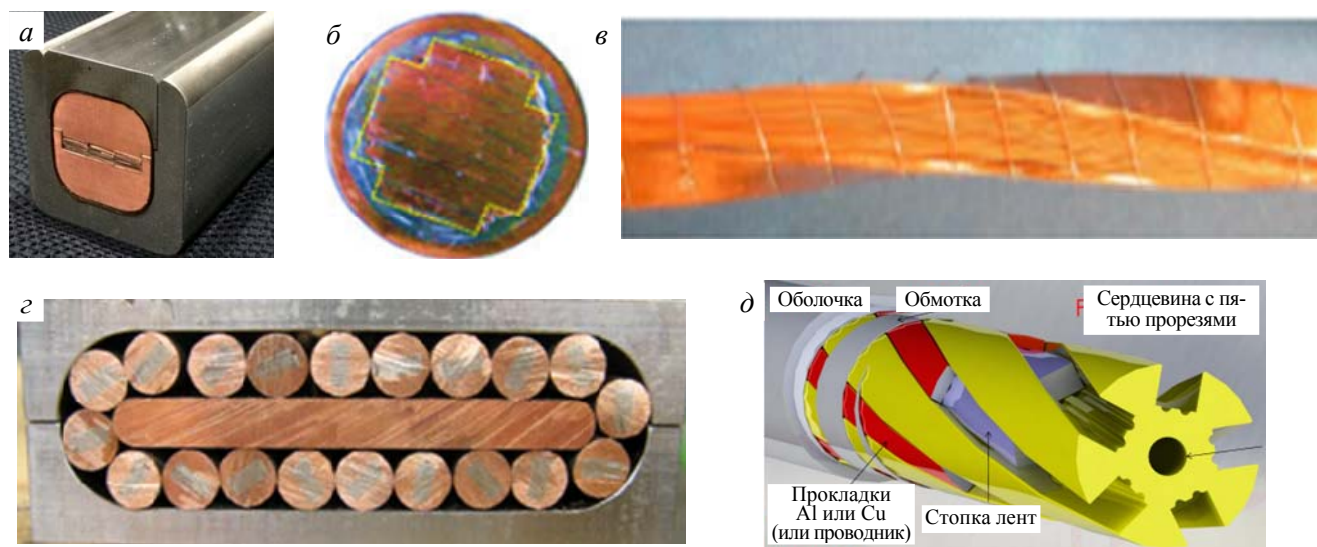


Рис. 1. Конструкции ВТСП-проводов типа Stacked-Tape Cable (провода, показанные на рисунке, обозначают обычно общим термином Stacked-Tape Cables)

Токопроводящая часть провода собирается в две стадии. На первой стадии собираются стопки лент, которые могут пропаиваться (см. рис. 1, б, г), скручиваться (см. рис. 1, в, г) и/или заключаться в медную оболочку (см. рис. 1, б, г). На второй стадии подготовленные стопки либо располагаются в плоскости (см. рис. 1, а), либо скручиваются вокруг сердечника (см. рис. 1, г, д).

Характерной особенностью таких проводов является отсутствие транспозиции ВТСП-лент на первой стадии и транспозиции стопок лент на второй стадии (кроме рис. 1, а).

Провода на основе скруток ВТСП-лент. Первичным элементом в таких проводах является многослойная скрутка лент (рис. 2, а, б, з), которые скручиваются вдоль продольной оси (рис. 2, в, д). Как и в предыдущих конструкциях, токопроводящая часть провода собирается в две стадии. Первичная многослойная скрутка получила название CORC wire [6, 7], и соответственно провода, показанные на рис. 2, в, д, называют проводами типа CORC. Основным стимулирующим фактором создания таких проводов послужило желание создать более гибкий по сравнению со стопками ВТСП-элемент, позволяющий изгибать провод на меньший радиус. Это достигается скруткой вокруг сердечника малого диаметра большого количества очень тонких (30—50 мкм) и узких (1—4 мм) ВТСП-лент (см. рис. 2, з).

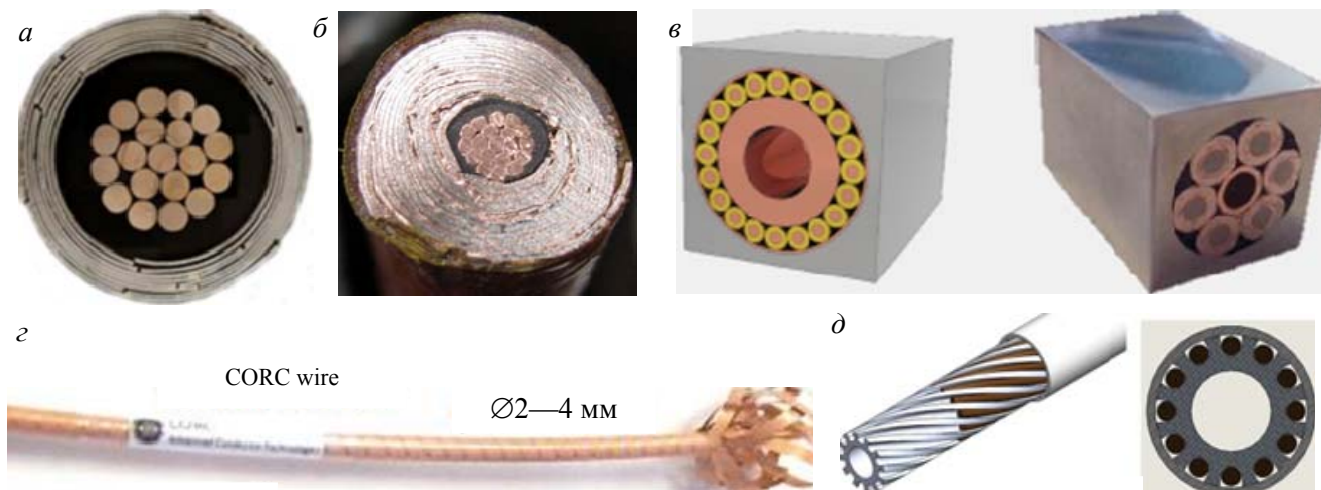


Рис. 2. Конструкции ВТСП-проводов типа CORC

Первичная многослойная скрутка ВТСП-лент, как и в предыдущих конструкциях, не является транспонированной, и для неё характерны все проблемы, связанные с неравномерностью распределения токов между лентами. Кроме того, такая конструкция является весьма рыхлой и очень чувствительной к поперечным нагрузкам. В экспериментах были обнаружены потеря устойчивости и нарушение геометрии при воздействии поперечных электромагнитных усилий [8].

В качестве полностью транспонированного первичного элемента могут использоваться так называемые кабели Рёбеля (Roebel cable) [9, 10]. Однако это направление пока не получило достаточного развития, что связано с низкими механическими характеристиками и высокой стоимостью кабеля, при изготовлении которого не менее половины дорогостоящей ВТСП-ленты уходит в отходы.

Многочисленные испытания коротких образцов проводов типа Stacked-Tape Cable и CORC Cable выявили ряд их существенных недостатков, связанных с неравномерным распределением токов между лентами в стопках, недостаточной устойчивостью к термомеханическим и циклическим воздействиям. Критический ток в проводниках заметно меньше суммы критических токов лент, из которых они изготовлены. Исключением из общего ряда является прототип проводника для японского стелларатора FFHR (см. рис. 1, а), изготовленного из параллельных не скрученных стопок лент [5]. В этом эксперименте удалось добиться равномерного распределения тока между лентами на коротком образце за счёт сравнительно большого входного сопротивления на соединении каждой ленты с токовводом. Такое решение не приемлемо при создании длинномерных проводников. Ещё одним конструктивным решением, обеспечивающим равномерное распределение токов между лентами, является многоповивная конструкция жил сверхпроводящих силовых кабелей, в которых удаётся выровнять индуктивности повивов [11, 12]. Однако в таких конструкциях не удаётся достичь высокой конструктивной плотности тока в сильных магнитных полях.

Таким образом, в настоящее время не разработаны ВТСП-конструкции проводов типа Cable-in-Conduit, удовлетворяющие всем требованиям, предъявляемым к ним разработчиками крупных магнитных систем.

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПРОВОДОВ С ПОЛНОСТЬЮ ТРАНСПОНИРОВАННОЙ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ВТСП-ЖИЛОЙ

Общая концепция конструкции первичного элемента токопроводящей жилы:

— ВТСП-ленты располагаются только в один повив;

- ВТСП-ленты располагаются радиально;
- между ВТСП-лентами располагаются трапециевидные или треугольные вставки из несверхпроводящего материала;
- каждая лента (или две ленты) с вставкой образуют V-образные элементы, которые скручиваются вокруг сердечника.

Такой первичный элемент в ряде случаев может использоваться в качестве токопроводящей жилы провода однократной сборки либо в качестве элемента скрутки в жиле двукратной сборки, как и в описанных конструкциях.

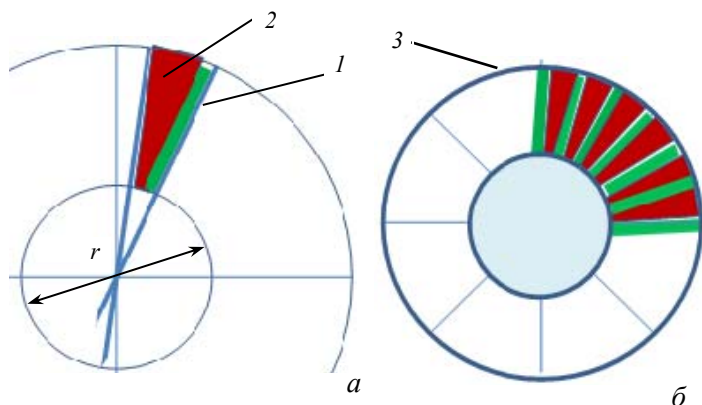


Рис. 3. Схема V-образного элемента, содержащего ВТСП-ленту 1 и трапециевидную вставку 2 (а), и схема ВТСП-токопроводящей жилы, обмотанной фиксирующей лентой 3 (б)

V-образный элемент показан на рис. 3, а. Он состоит из плоской сверхпроводящей ленты (или двух лент) и трапециевидной вставки. ВТСП-лента и вставка могут предварительно спаиваться или соединяться непосредственно в процессе скрутки токопроводящего элемента первой стадии. Границы элемента строго определяются радиальными линиями. Такие элементы наматываются на ребро в один слой по всей окружности круглого опорного элемента и обматываются сверху фиксирующей лентой (рис. 3, б).

Для уменьшения влияния поперечной нагрузки на ВТСП-ленту возможно изготовление трапециевидного элемента несколько большей высоты, чем ширина ленты. В каче-

стве материала такой вставки может использоваться медь, латунь, нержавеющая сталь или другие материалы.

Чтобы не путать полученный V-образный элемент со Stack и CORC, предлагаем его назвать (V-Shape) VS-элемент и соответственно проводники VS-типа.

Количество таких элементов в конструкции определяется следующим образом:

$$N = 2\pi r / (a + b)k, \quad (1)$$

где r — радиус центрального опорного элемента; a — толщина ВТСП-ленты; b — ширина нижней части трапециевидного элемента; k — коэффициент укрутки.

Коэффициент укрутки связан с увеличением эффективного поперечного размера элемента при его наложении под углом к продольной оси. Токопроводящую VS-жилу получаем путём скрутки V-образных элементов вокруг центральной опоры, как это показано на рис 3, б.

Преимущества конструкции токопроводящей VS-жилы:

- полная транспозиция;
- высокая конструктивная плотность тока;
- высокая жёсткость конструкции за счёт использования прочных клиновых вставок;
- возможность легко варьировать поперечное сопротивление провода и потери энергии в нестационарных режимах работы за счёт использования различных материалов;
- защита сверхпроводника от поперечных механических нагрузок;
- широкие возможности варьирования количеством лент и диаметром элемента;
- широкие возможности варьирования сечением меди за счёт размеров вставки, размещения меди в центральном опорном элементе, наложения повива медных элементов поверх обмотки фиксирующей лентой.

Недостатки конструкции:

- отсутствие опыта изготовления VS-элемента и сборки токопроводящей ВТСП-жилы провода;
- отсутствие результатов испытаний.

При использовании VS-провода в качестве самостоятельного токопроводящего элемента его конструкция может выглядеть так, как показано на рис. 4. При изготовлении полномасштабного проводника

VS-жила заключается в упрочняющую трубчатую оболочку и слегка обжимается. Далее накладывается вторая оболочка, которая может играть роль упрочняющего или стабилизирующего элемента, а также образует каналы для прокачки охлаждающего агента (см. рис. 4, а). На рис. 4, б, в показана жила с размещением дополнительного стабилизатора между двумя упрочняющими оболочками. В этой же зоне организуются каналы для прокачки хладагента.

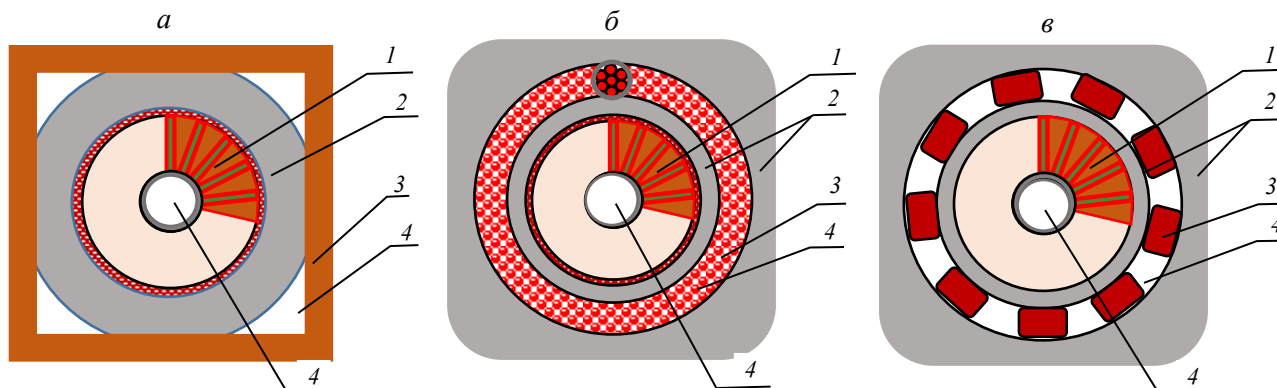


Рис. 4. ВТСП-проводники на основе VS-провода однократной скрутки: 1 — VS-жила; 2 — упрочняющие оболочки; 3 — стабилизирующий материал; 4 — каналы для прокачки хладагента

Рабочая величина максимального расчётного тока в такой конструкции может оцениваться очевидным соотношением

$$I_{\max} = i_l 2\pi r / (a + b) k, \quad (2)$$

где i_l — критический ток одной ленты.

Рассмотрим несколько примеров возможной реализации такого VS-провода. Примем за базовую ленту компании «СуперОкс» (Россия) [13]. Критический ток лент в поперечном поле 16–20 Тл порядка 500 А для ленты шириной 4 мм (рис. 5). Толщина ленты с подложкой толщиной 60 мкм — 76 мкм, с подложкой 100 мкм — 116 мкм.

Примеры оценочных расчётов приведены в табл. 1. Расчёт проведён для лент, предназначенных для эксплуатации в жидком гелии шириной 4 мм ($I_c = 500$ А) и 3 мм ($I_c = 375$ А).

Как видно из приведённых в таблице примеров, вариабельность конструкции VS-жилы достаточно высокая. Основными изменяемыми параметрами являются ширина и толщина ВТСП-ленты, диаметр сердечника и размеры несверхпроводящей вставки. Так, значение максимального тока в табл. 1 может в предельном случае быть удвоено при уменьшении ширины нижнего основания вставки до нуля, т.е. при переходе от трапецевидной к клиновидной (треугольной) форме вставки. Необходимое количество стабилизирующего металла может быть размещено как в самой VS-жиле, так и поверх неё. Механическое упрочнение провода осуществляется путём наложения внешней оболочки из высокопрочного материала (см. рис. 4 и 6).

Таблица 1. Оценка максимального расчётного критического тока в VS-проводнике при индукции магнитного поля 16–20 Тл и температуре 4,2 К

VS-жила	Ширина ленты, мм	Толщина ленты и вставки ($a + b$), мкм	Диаметр сердечника D , мм	Количество VS-элементов	Диаметр ВТСП-жилы, мм	Максимальный ток I_{\max} , кА	Максимальная плотность тока, кА/см ²
VS-1	4	76+76	4	80	12	40	35
VS-2	3	76+76	4	80	10	30	38
VS-3	3	76+76	3	58	9	22	34
VS-4	4	76+76	8	162	16	81	40

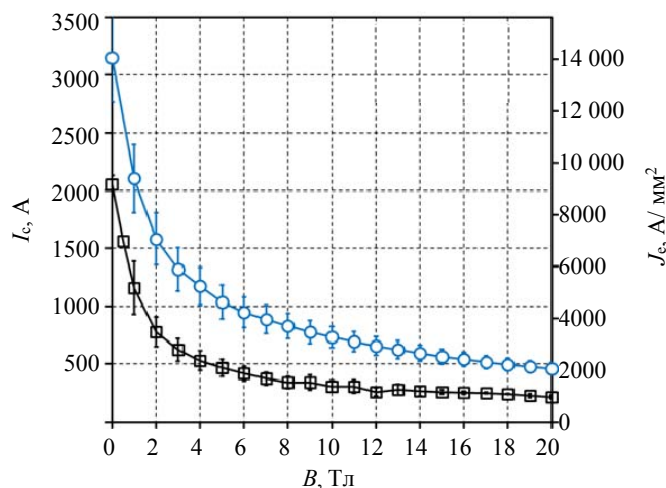


Рис. 5. Зависимость критического тока и критической плотности тока от индукции магнитного поля для двух лент шириной 4 мм [13], предназначенных для эксплуатации при температуре жидкого гелия (○) и жидкого азота (■). Все измерения при 4,2 К

Рабочие токи в таких конструкциях могут достигать 20—70 кА. Ключевым вопросом во многих конструкциях проводников на основе ВТСП-лент является их устойчивость к термомеханическим воздействиям, что связано с низкими механическими характеристиками самой сверхпроводящей ленты. В конструкции VS-типа лента наматывается радиально, что не является наилучшим вариантом с точки зрения возникающих в кабеле напряжений при изгибе проводника в процессе намотки магнита. Однако в такой конструкции достигается размещение большого количества лент при ограниченном внешнем диаметре (9—12 мм), что позволяет надеяться на достижение удовлетворительных механических характеристик. При отсутствии прямых экспериментов можно провести сравнение с характеристиками, полученными при изгибе скрученной стопки лент (см. рис. 1, в). При изгибе такой скрутки ленты периодически изгибаются «на ребро». Авторы работы [14] при испытаниях скрученной стопки лент на изгиб получили результаты, представленные в табл. 2. Стопка лент имела габариты 4,8×4,8 мм и была скручена с шагом 200 мм. При испытаниях катушки диаметром 500 мм, намотанной из этого кабеля, деградация критического тока не наблюдалась [3].

Таблица 2. Деградация критического тока под действием деформации изгиба

Диаметр изгиба	Величина деградации, %
250 мм	1,9
140 мм	5,4
Выпрямление после изгиба 140 мм	3,6

Сравнение данных табл. 1 и 2 позволяет надеяться на минимальный диаметр изгиба конструкций 1, 2 и 3 порядка 500—700 мм и для конструкции 4 порядка 800—1000 мм. При этом снижение суммарного критического тока лент не должно превышать 5%.

ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ПРОВОДА ТИПА CABLE-IN-CONDUIT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСКОЛЬКИХ VS-ЖИЛ В КАЧЕСТВЕ СУБЭЛЕМЕНТОВ

На рис. 6 показаны несколько возможных вариантов изготовления VS-проводов на большие токи. Принимая во внимание коэффициенты заполнения (табл. 3), при скрутке различного количества субэлементов получаем возможную максимальную конструктивную плотность тока (по токопроводящей жиле под упрочняющим элементом) на уровне 20—25 кА/см² при 4,2 К в поле 16—18 Тл.

Сечение упрочняющих элементов и стабилизирующего металла может изменяться в подобных конструкциях в широких пределах.

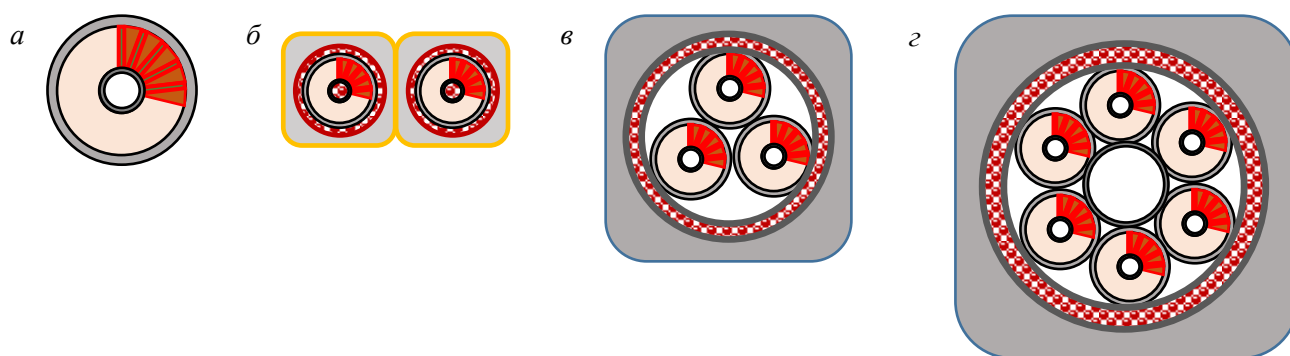







Рис. 6. Варианты конструкций VS-проводников единичной (а) и двухстадийной сборки (б, в, г)

В табл. 3 представлены пять возможных конструкций жилы сильноточного провода, состоящего из VS-элементов VS-1 и VS-3 из табл. 1. В столбце 3 табл. 3 указаны габаритные размеры или диаметр описанной окружности токопроводящей ВТСП-жилы провода в единицах диаметра первичного элемента.

Максимальный расчётный ток конструкций, равный сумме критических токов лент, охватывает широкий диапазон значений. Рабочий ток магнита должен быть меньше указанных в таблице значений на величину, определяемую разработчиками магнитной системы с учётом результатов предварительных испытаний проводов.

Т а б л и ц а 3. Варианты конструкций VS-проводов двухстадийной сборки

Номер п/п	Количество VS-субэлементов	Внешний диаметр	Коэффициент заполнения	Максимальный ток для VS-1, кА	Максимальный ток для VS-3, кА
1	2	3	4	5	6
1*		1:2		80 (12×24)	44 (9×18)
2		≈2,154	0,6466	120 (25,9)	66 (19,4)
3		≈2,414	0,6864	160 (29,0)	88 (21,7)
4		≈2,701	0,6854	200 (32,4)	110 (24,3)
5		3,0	0,6667	240 (36,0)	132 (27,0)

Примечание. Конструкция из двух субэлементов (кабелей) возможна при намотке двух изолированных проводников параллельно (two-in-hand).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОДОВ ТИПА VS

Как видно из табл. 1, при изготовлении VS-жилы используется большое количество первичных элементов (58—162 шт.). Если в первичном V-образном элементе (см. рис. 3, *a*) сверхпроводящую ленту и вставку не спаивать, тогда количество первичных элементов удваивается. Для скрутки такого количества элементов использование крутильных машин классической скрутки нецелесообразно. Это связано с тем, что в таких машинах скрутка производится путём вращения отдающих катушек, расположенных во вращающихся клетях. Стандартное количество отдающих катушек в клети 6—12—18—24. Более рациональным представляется использование машин типа Drum-Twister. В таких машинах отдающие катушки располагаются на неподвижных стойках, а скрутка жилы происходит за счёт вращения приёмного барабана. На такой же машине целесообразно скручивать и жилы двухстадийной скрутки, показанные в табл. 3 и на рис. 6.

Технологическую операцию скрутки можно заметно упростить, сгруппировав часть ВТСП-лент в пакеты, как это показано на рис. 7. В этой конструкции ленты сгруппированы в шесть пакетов, обмотанных металлической лентой (из титана или из нержавеющей стали). Трапецевидные или треугольные вставки изготовлены из формованных металлических трубок, которые в зависимости от материала могут служить и стабилизатором, и каналом для прокачки хладагента, и упрочняющим элементом.

В этой конструкции внутри пакетов транспозиция лент по отношению к собственному полю отсутствует, однако расположение лент радиально в один слой обеспечивает транспозицию пакетов по отношению к внешнему полю. Шаг транспозиции в этом случае, конечно, больше, чем в VS-варианте с единичными лентами.

Представленные в качестве примера на рис. 7, *a, б* конструкции проводников имеют существенно различное поперечное сопротивление. Очевидно, что в конструкции на рис. 7, *б* потери в нестационарных режимах работы будут существенно меньше, чем в конструкции на рис. 7, *a*. В качестве стабилизи-

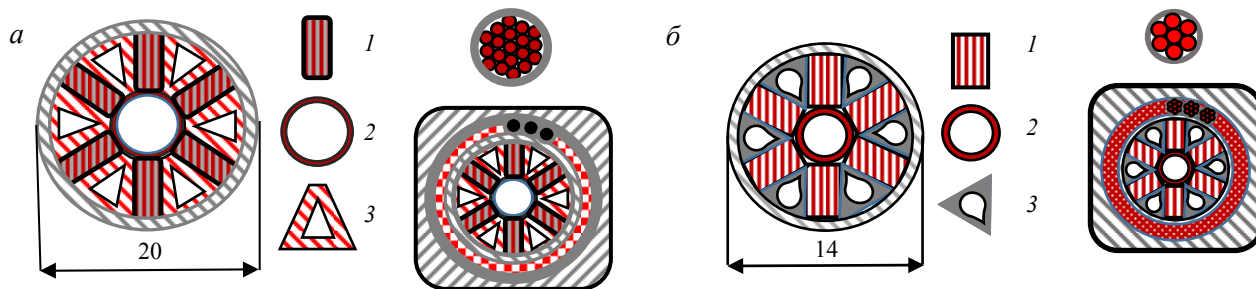


Рис. 7. Варианты конструкций единичных кабелей с групповым размещением ВТСП-лент: 1 — шесть радиально ориентированных пакетов из филаментированных ВТСП-лент с медным покрытием шириной 6 мм, обмотанных титановой фольгой $\Delta = 0,025$ мм, 2 — формер—спираль (или трубка) из нержавеющей стали $\varnothing 6 \times 0,5$ мм, 3 — трапецевидные клинья, изготовленные из медной трубки $\varnothing 8 \times 1$ мм² (*a*); 1 — шесть радиально ориентированных пакетов из филаментированных ВТСП-лент с латунным покрытием шириной 4 мм, обмотанных титановой фольгой $\Delta = 0,025$ мм, 2 — формер — медная трубка $\varnothing 4 \times 0,5$ мм, 3 — треугольные клинья, изготовленные из стальной трубки $\varnothing 4 \times 0,5$ мм (*б*)

рующих элементов для обеих конструкций проводника используются субэлементы, скрученные из никелированных медных ($RRR = 100\text{—}200$) проволок $\varnothing 1,2$ мм и обмотанные стальной или титановой лентой (см. рис. 7, а, б). Медные субэлементы обматываются вокруг сверхпроводящей VS-жилы, заключённой в стальную оболочку. Скрутка субэлементов обматывается стальной или титановой лентой, затягивается в стальную оболочку типа круг в квадрате и слегка компактируется до конечного размера.

ПРОЕКТИРУЕМЫЕ УСТАНОВКИ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ УТС И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В НИХ ПРОВОДНИКОВ ТИПА VS

В настоящее время в стадии разработки находится большое количество крупных физических установок для исследования в области УТС. В этих установках для удержания плазмы предполагается использовать магнитные системы как на основе НТСП, так и на основе ВТСП-материалов. Основные параметры магнитных систем большинства этих установок представлены в табл. 4.

Таблица 4. Основные параметры некоторых из проектируемых магнитных систем для установок УТС

Установка/подсистема	Рабочий ток I_{op} , кА	Рабочая температура T , К	Максимальное магнитное поле B_{max} , Тл
ITER/TF*	68	4,5	12
ITER/CS**	46	4,5	12
FNSF/TF	70	4,75	16
EU-DEMO/TF	82	4,75	13,4
EU-DEMO/CS	51	10,5	17,5
K-DEMO/TF	66	4,5	16
FFHR/HD***	~100	20	12
DTT/TF	44,8	4,5	11,9
DTT/CS	29	4,5	13,4
DTT/CS HTS insert	30—35	4,5	~18—20
SPARC/TF	~50	?	23
ARC/TF	~100	20	20

Примечание. TF* — катушки тороидального поля; CS** — секции центрального соленоида; HD*** — геликоидальный магнит.

Предлагаемая новая конструкция провода на основе ВТСП-лент REBCO может быть успешно использована для создания проводников в установках с сильным полем и/или в установках, где рабочая температура предполагается выше 10 К. Конечно, идея конструкции должна быть всесторонне опробована и исследована как с точки зрения технологии изготовления проводника, так и с точки зрения электрофизических и механических свойств и возможностей использования в конкретной установке. В качестве примера мы рассмотрели возможность использования проводников VS-типа в исследовательской установке относительно скромных размеров. Для этого нами выбрана магнитная система установки с размерами масштаба DTT, но с максимальной индукцией магнитного поля как на катушках тороидального поля, так и на секциях центрального соленоида порядка 18—20 Тл. Основные характеристики таких проводников приведены в табл. 5. Сразу оговоримся, что приведённые здесь конструкции носят весьма условный характер, но в перспективе могут быть доработаны в соответствии с конкретными требованиями, предъявляемыми к проводнику установки. К таким требованиям относятся соотношение между критическим и рабочим током, требования к АС-потерям и устойчивости в нестационарных режимах работы, максимальные напряжение и температура проводника при защитном выводе энергии и пр.

Таблица 5. Основные характеристики проводников

Проводник	Сечение, мм	I_c , кА ($B = 19$ Тл, $T = 4,2$ К)	I_{op} , кА	Провод	S меди, мм ²	S стали, мм ²
ЦС	23×23	40	32	VS-1, рис. 6, б	120	340
	16×32	44	32	VS-3, рис. 6, б	120	340
	26×26	64	32	Рис. 7, б	120	340
ТП	32×32	90	67,5	VS-2, рис. 6, в	430	450
	36×36	106	67,5	Рис. 7, а	430	450

БЛИЖАЙШИЕ ШАГИ НА ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВТСП-ПРОВОДНИКОВ VS-ТИПА

Любая идея от её предложения и первичной оценки её преимуществ до реализации в конкретном издании должна пройти непростой путь, состоящий из нескольких основных этапов. Первым из таких этапов является проведение исследований в области разработки технологии изготовления VS-проводников, пред-

ложенных конструкций как на основе единичных лент, так и на основе пакетов (стопок) ВТСП-лент. Необходимо также провести расчётно-теоретические исследования предложенных конструкций применительно к конкретной проектируемой электромагнитной системе. Параллельно с этим необходимо провести исследования механических и электрофизических свойств одностадийных скруток и пакетов лент на представительных макетах. Всё это планируется провести в ближайшие 1,5 года.

Следующим этапом является изготовление и представительные испытания макетов и полномасштабных проводников, а также создание на основе результатов испытаний и уже существующих методик расчёта [15, 16] доработанных конструкций проводников. Предполагается, что при благоприятных обстоятельствах все указанные экспериментальные и расчётные исследования будут завершены в течение ближайших 2—3 лет.

ВЫВОДЫ

Представленные принципиально новые конструкции сильноточных сверхпроводящих проводов позволяют проектировать обмотки крупных сверхпроводящих магнитов с высокой конструктивной плотностью тока в полях индукцией 16—20 Тл. Наличие полной транспозиции сверхпроводящих лент в проводниках VS-типа обеспечивает равномерное распределение токов между ВТСП-лентами и рациональное использование дорогостоящего сверхпроводящего материала. Большие возможности варьирования характеристиками проводников делают их перспективными для использования при создании широкой гаммы сверхпроводящих магнитных систем. Первостепенной задачей в настоящее время является проведение полномасштабных расчётно-теоретических и технологических исследований предложенных конструкций проводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ten Kate H.** Super-Conductors for Successful Magnets. — IEEE/CSC & ESAS SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM, November 2019. Plenary Presentation Mo—Mo—PL1-01 given at MT26, 22—27 September 2019, Vancouver, Canada.
2. **Bruzzone P.** Cable Behavior and Specific Issues for HTS Tapes. — WAMHTS, Budapest, April 11—12, 2019.
3. **Takayasu M., Minervini J.V., Bromberg L., Rudziak M.K., Wong T.** Investigation of twisted stacked-tape cable conductor. — AIP Conf. Proc., 2012, vol. 1435, p. 273; <https://doi.org/10.1063/1.4712106>.
4. **Chiesa L., Allen N.C., Takayasu M.** Electromechanical Investigation of 2G HTS Twisted Stacked-Tape Cable Conductors. — IEEE Trans. on Appl. Supercond., June 2014, 24(3):6600405.
5. **Terazaki Y., Yanagi N., Ito S., Seino Y., Hamaguchi S., Tamura H., Mito T., Hashizume H., Sagara A.** Measurement and analysis of critical current of 100-kA class simply-stacked HTS conductors. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2015, vol. 25, p. 4602905.
6. **Van der Laan D.C., Weiss J.D., McRae D.M.** Status of CORC cables and wires for use in high-field magnets and power systems a decade after their introduction. — Supercond. Sci. Technol., 2019, vol. 32, p. 033001.
7. **Weiss J.D., Mulder T., ten Kate H.J.J., van der Laan D.C.** Introduction of CORC® wires: highly flexible, round high-temperature superconducting wires for magnet and power transmission applications. — Supercond. Sci. Technol., 2017, vol. 30, p. 014002.
8. **Mulder T., Weiss J., van der Laan D., Dudarev F., ten Kate H.** Development of ReBCO-CORC Cable-In-Conduit Conductors for Large-Scale Magnets. Report Mon-Af-Or6-02 on MT26, Vancouver, Canada, September, 2019.
9. **Goldacker W., Nast R., Kotzyba G., Schlachter S.I., Frank A., Ringsdorf B., Schmidt C., Komarek P.** High current DyBCO-ROEBEL Assembled Coated Conductor (RACC). — J. of Physics: Conference Series, June 2006, vol. 43, p. 901—904.
10. **Long N.J., Badcock R.A., Hamilton K., Wright A., Jiang Z., Lakshmi L.S.** Development of YBCO Roebel cables for high current transport and low AC loss applications. — J. of Physics: Conference Series, 2010, vol. 234, p. 022021.
11. **Корсунов П.Ю., Рябин Т.В., Сытников В.Е.** Проект ВТСП КЛ по соединению ПС 330 кВ Центральная и ПС 220 кВ РП-9 в Санкт-Петербурге. — Энергия единой сети, 2017, № 3, с. 32.
12. **Высоцкий В.С., Занегин С.Ю., Зубко В.В., Фетисов С.С.** Оптимизация конструкции компактных силовых кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводящих проводников. — Кабели и провода, 2018, т. 5, с. 374.
13. **Molodyk A.** Present directions for 2G HTS wire development at SuperOx. Report on EUCAS, Glasgow, UK, September 2019.
14. **Minervini J.V., Takayasu M., Mangioaro F., Bromberg L., Michael P.** Report on International Symposium on DC Superconducting Power Transmission Line. — Development of HTS High Current Cables and Joints for DC Power Applications Chubu University, Japan, March, 2014.
15. **Lelekhov S.A.** A physical model and numerical method for losses investigation in superconducting cable-in-conduit conductors (CICC). — Cryogenics, 2006, vol. 46, № 1.
16. **Lelekhov S.A., Tronza V.I.** AC Loss before and after Cycling Mechanical Load in ITER RF Cable-in-Conduit Conductor (CICC). — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, vol. 23, № 3, p. 4201005.



Виктор Евгеньевич Сытников, заместитель научного руководителя, действительный член АЭН РФ, д. техн. н.; АО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», 115201 Москва, Каширское ш. 22, к. 3, Россия



Сергей Андреевич Лелехов, в.н.с., к. техн. н., доцент, ветеран атомной науки и техники; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 29 мая 2020 г.

После доработки 6 июня 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 31—40.