УДК 538.945

Статья

Особенности электрофизических свойств сверхпроводников на основе Nb_3Sn с общим барьером, изготовленных по методу внутреннего источника олова

Н. В. Коновалова[1,*], И. М. Абдюханов[1], А. С. Цаплева[1], И. И. Савельев[1], М. В. Алексеев[1], К. А. Мареев[1], Д.С. Новосилова[1]

АО Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара, ул. Рогова, 5а, 123098, Москва, Россия

* e-mail: NViKonovalova@bochvar.ru

Поступила в редакцию 08.12.25, после переработки 11.12.25, принята к публикации 15.12.25.

Представлены результаты исследования многоволоконных Nb_3Sn сверхпроводников, изготовленных по методу внутреннего источника олова, с общим барьером. Изготовлены две экспериментальные партии сверхпроводников, отличающиеся количеством субэлементов, диаметром 1.0 и 0.82 мм. Исследовано влияние конструктивных параметров на микроструктуру, плотность критического тока, параметр *RRR* и гистерезисные потери. Установлено, что увеличение количества субэлементов приводит к росту плотности критического тока в магнитном поле 12 Тл. Показано, что уменьшение диаметра сверхпроводника сопровождается искажением геометрии субэлементов и ростом гистерезисных потерь. Продемонстрировано, что применение медных разделителей, вследствие их деформации в процессе волочения, не обеспечивает существенного снижения гистерезисных потерь. Наиболее эффективным подходом к снижению потерь является использование разделителей из резистивных материалов, например, из сплава Cu-Mn, препятствующих электромагнитной связи между волокнами.

Ключевые слова: сверхпроводник; стренд; Nb_3Sn; микроструктура; гистерезисные потери; внутренний источник.

DOI: 10.62539/2949-5644-2025-9-4-71-82

1. Введение

В настоящее время ведутся проектные и научно-исследовательские работы по созданию устройств термоядерного синтеза. Многие из стран участниц проекта по строительству Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР) реализуют собственные программы по созданию национальных демонстрационных термоядерных станций. Европа, Китай, Южная Корея и Япония разрабатывают проекты на базе классического токамака и планируют запустить их к 2050 году. Так, например, в Китае уже создан полностью сверхпроводящий токамак EAST и была продемонстрирована температура плазмы свыше 100 млн. К. Следующая установка — Китайский Термоядерный испытательный реактор (Chinese Fusion Engineering Testing Reactor, CFETR) должна выйти на мощность не менее 200 МВт к 2035 – 2040 годам [1]. Наряду с разработками на базе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), таких как NbTi и Nb_3Sn, в мире активно ведутся работы по созданию магнитных систем полностью на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Прогресс в технологии ВТСП открывает возможности для создания как компактных, так и крупномасштабных термоядерных устройств, работающих в сильных магнитных полях [2]. Однако, с экономической точки зрения, гибридные магниты, использующие как НТСП, так и ВТСП, представляются оптимальным выбором. Для CFETR — максимальная величина магнитного поля составит 15 Тл, поэтому планируется использовать как низкотемпературные сверхпроводники: сильноточные Nb_3Sn сверхпроводники, сверхпроводники Nb_3Sn типа ИТЭР и NbTi сверхпроводники, так и высокотемпературные: Bi-2212 и REBCO [3]. Для магнитной системы европейского проекта

EU-DEMO также рассматривается использование сверхпроводников на основе Nb_3Sn, полученных методом внутреннего источника [4]. В одном из проектов магнитной системы термоядерного реактора в России [5] планировалось использование Nb_3Sn сверхпроводников, полученных методом внутреннего источника олова. Однако, известно, что сильноточные Nb_3Sn сверхпроводники обладают значительным уровнем гистерезисных потерь (2500 мДж для цикла ± 5Тл), и для их применения в магнитных системах установок термоядерного синтеза необходимо разработать конструкцию сверхпроводящего композита, обеспечивающую более низкий уровень потерь на перемагничивание [6].

В связи с этим одной из задач является снижение уровня гистерезисных потерь таких стрендов. Работы в этом направлении ведутся как в России, так и других странах [7–11]. Для решения этой задачи применяют разделители внутри каждого субэлемента, увеличивают межволоконные расстояния и используют резистивные материалы (например, сплавы меди с марганцем) для предотвращения эффекта бриджинга, который приводит наряду с увеличением критического тока к росту гистерезисных потерь.

В данной работе представлены результаты исследования микроструктуры и свойств многоволоконных Nb_3Sn стрендов, изготовленных по методу внутреннего источника олова. Целью исследования является установление взаимосвязи между технологическими параметрами и величиной гистерезисных потерь сверхпроводников.

2. Использованные материалы и методы исследования

Для сравнительного анализа влияния конструкции стренда на его электрофизические характеристики в АО «ВНИИНМ» разработаны и изготовлены две экспериментальные партии сверхпроводников по методу внутреннего источника олова, отличающиеся количеством субэлементов (Таблица 1). Изготовленные сверхпроводники состояли из 19 и 31 субэлемента, окружённых общим танталовым барьером, отделяющим их от внешней медной стабилизирующей оболочки. В центре каждого субэлемента размещался оловянный пруток, а вокруг него в медной матрице располагались ниобиевые волокна, каждое из которых имело медную оболочку; при этом ниобиевые волокна были разделены на два сектора медными разделителями (рис. 1б) [12]. Каждое из волокон легировано титаном за счёт вставок из сплава HT47 согласно способу [13]. Оба проводника (получившие обозначения ДТ31 и ДТ19) проволочены до диаметров 1.0 мм и 0.82 мм.

Таблица 1. Параметры конструкции сверхпроводников на разных диаметрах.

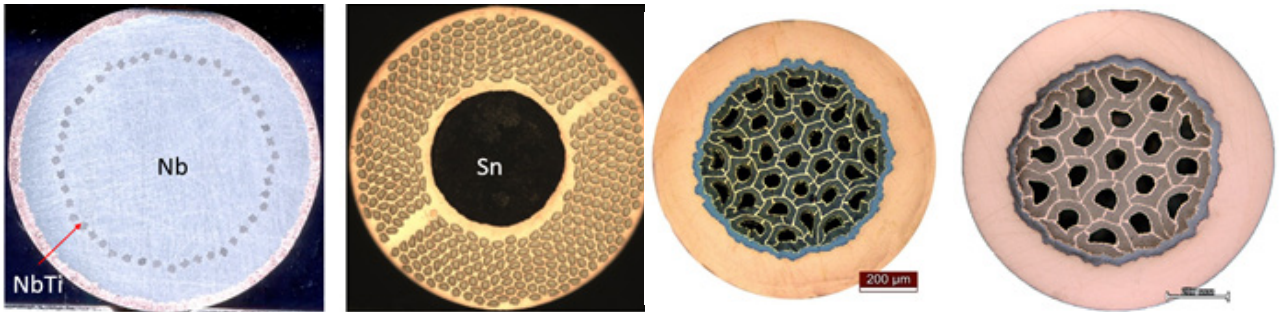
Параметр	**ДТ19**		**ДТ31**	
Тип барьера	Общий Ta		Общий Ta	
Диаметр проводника, мм	1	0.82	1	0.82
Количество субэлементов, шт.	19		31	
Размер субэлемента, мкм	143.2	117.4	108.5	88.9
Количество медных разделителей, шт	19 × 2		31 × 2	
Диаметр волокна, мкм	4.0	3.3	3.1	2.5

Образцы стрендов подвергали реакционной термической обработке (РТО) по режиму: 370 °C, 100 ч + 665 °C, 40 ч в вакууме с остаточным давлением не выше 5×10^5 мм рт. ст.

Микроструктуру поперечных сечений образцов до и после РТО исследовали на металлографических шлифах с помощью инвертируемого оптического микроскопа Leica DMI8A в светлом поле в интервале увеличений от 100 до 1000 крат. Содержание Sn определяли на сканирующем электронном микроскопе FEI Scios с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа (МРС анализ).

Перед проведением РТО образцы стрендов для измерения критического тока монти-

ровали на специальные цилиндрические оправки диаметром 32 мм типа VAMAS, а образцы для измерения гистерезисных потерь на цилиндрические оправки диаметром 6 мм. Критический ток образцов после РТО определяли стандартным четырехконтактным методом в соответствии с рекомендациями стандарта IEC МЭК 61788-2 по вольт-амперным характеристикам во внешнем магнитном поле 8–12 Тл при температуре 4.2 К на уровне электрического поля 0.1 мкВ/см с погрешностью не более 2%. Плотность критического тока J_c определяли с учетом соотношения параметра Cu/nonCu, погрешность определения которого также составляла ~ 2%. Гистерезисные потери измеряли методом вибрационного магнитометра в диапазоне полей ± 3 Тл. Параметр *RRR* определяли в соответствии с требованиями стандарта IEC МЭК 61788-11 как отношение электрических сопротивлений образца при температурах 273 и 20 К. Установленная погрешность определения не превышала 1%.



(а) (б) (в) (г)

Рис. 1. Микроструктура поперечных сечений: (а) — заготовки волокна, (б) — прутка (заготовки) субэлемента, (в), (г) — стрендов диаметром 1 мм с 31 и 19 субэлементами, соответственно.

3. Результаты и обсуждения

3.1 Исследование микроструктуры до РТО

Проведено исследование микроструктуры поперечного сечения образцов партий ДТ19 и ДТ31 (рис. 2 и 3). Отмечено, что обе партии характеризуются целым, без разрывов, однородным по толщине танталовым барьером. Многоволоконные субэлементы имеют относительно ровную форму, за исключением периферийных, прилегающих к барьеру (рис. 2).

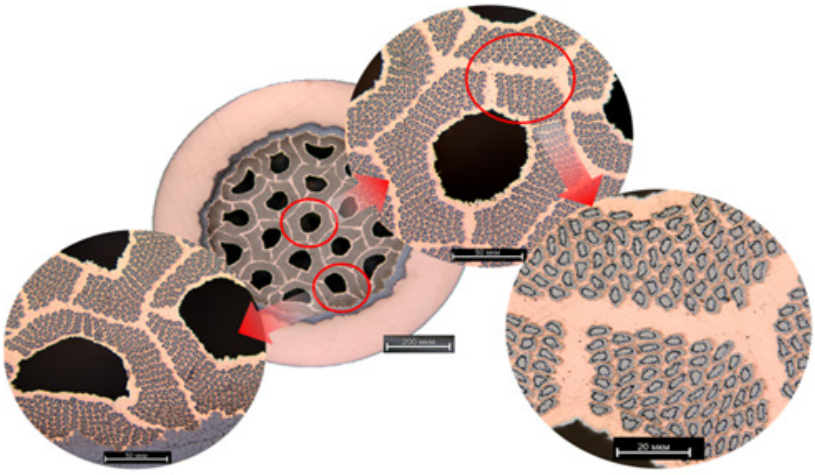


Рис. 2. Поперечное сечение стренда партии ДТ19 диаметром 1.0 мм.

Уменьшение диаметра сверхпроводника с 1.0 мм до 0.82 мм должно приводить к пропорциональному сокращению размеров всех структурных элементов: диаметра волокна, рас-

стояния между волокнами, а также расстояния между субэлементами. Однако, в реальном процессе изготовления композиционного стренда при деформации структурных элементов заготовки, имеющих различные механические свойства, кристаллические решетки, зеренную структуру и исходные геометрические параметры, а также расположение внутри заготовки, происходит значительное искажение их формы, которое особенно заметно вблизи внутреннего контура диффузионного барьера. Волокна приобретают сплюснутую форму и разветвленную поверхность в поперечном сечении. Расстояния между волокнами в субэлементах и между субэлементами становятся неравномерными. Анализ поперечных сечений сверхпроводников ДТ19 и ДТ31 диаметром 1.0 и 0.82 мм показал, что с уменьшением диаметра расстояния между ниобиевыми волокнами практически исчезают, а расстояние между секторами в субэлементах сокращается: для ДТ19 — с 4–9 до 2–6 мкм, для ДТ31 — с 3.5–7 до 1.5–5 мкм. Подобные искажения структурных элементов могут существенно влиять на величину гистерезисных потерь.

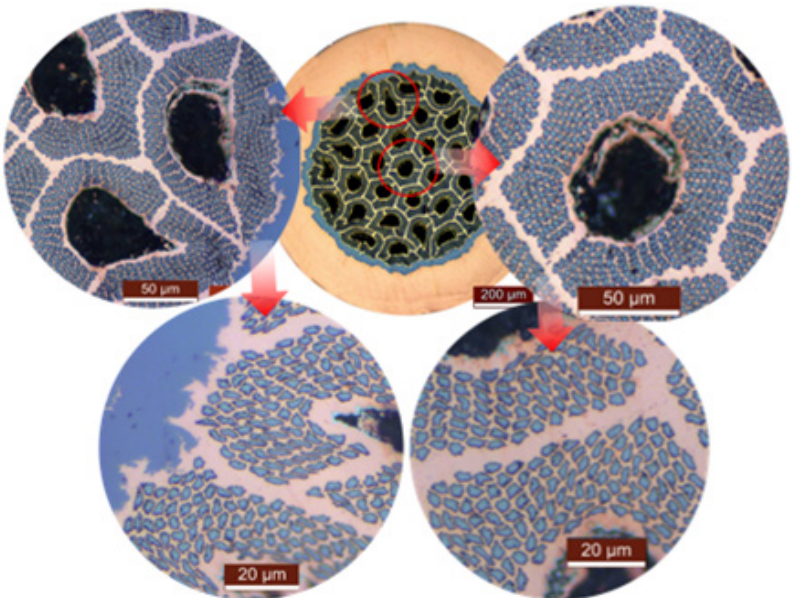
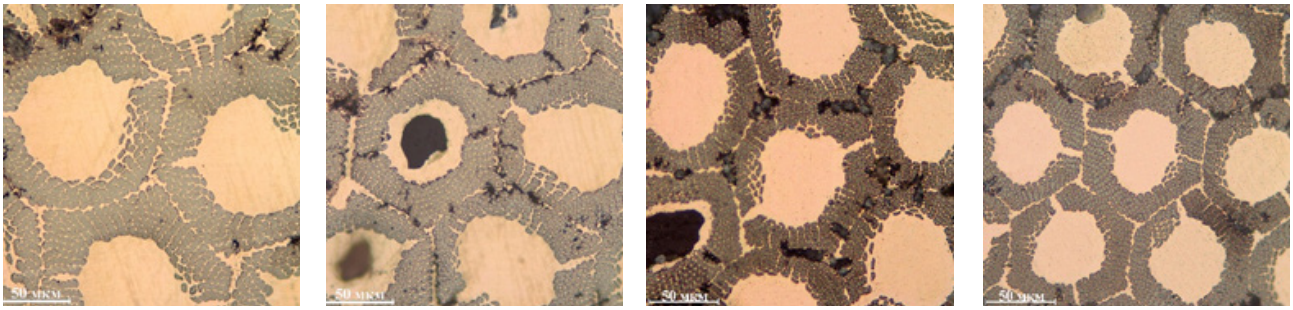


Рис. 3. Поперечное сечение стренда партии ДТ31 диаметром 1.0 мм.

3.2 Исследование микроструктуры и состава Nb_3Sn слоя после РТО

Проведено исследование микроструктуры образцов двух партий после РТО по режиму 370 °C, 100 ч + 665 °C, 40 ч (рис. 4). В процессе РТО происходит изменение геометрических размеров структурных составляющих композита. Увеличение волокон в результате превращения ниобия в Nb_3Sn в поперечном сечении составляет 1.3–1.38 раза [14] преимущественно в радиальном направлении; в осевом направлении оно не превышает 1%, при этом медные прослойки между волокнами сокращаются в 0.7 раза.



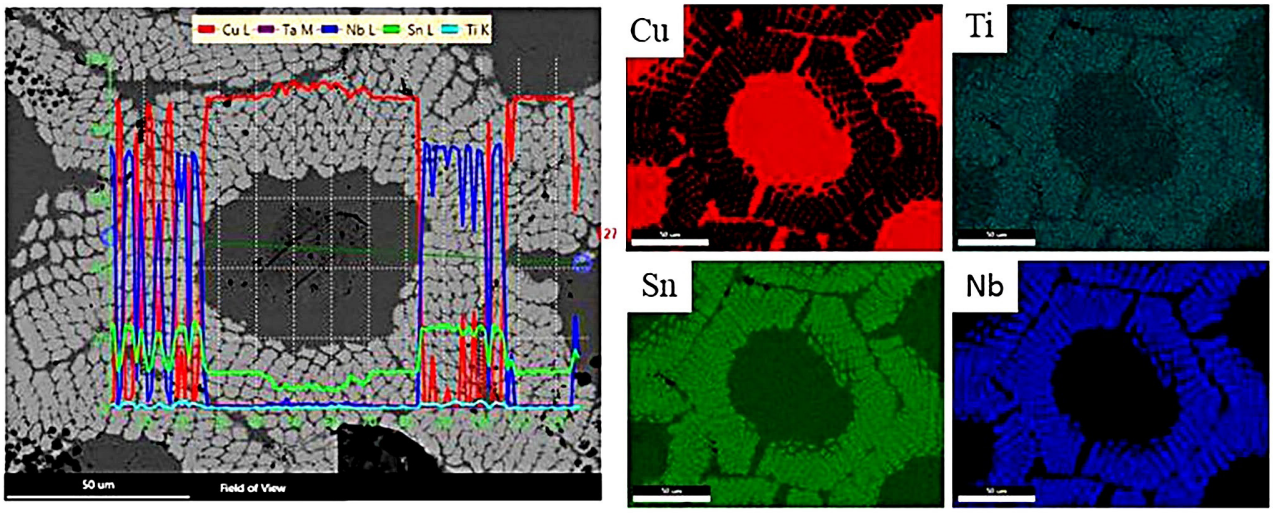
(а) — Ø1.0 мм, ДТ19 (б) — Ø0.82 мм, ДТ19 (в) — Ø1.0 мм, ДТ31 (г) — Ø0.82 мм, ДТ31

Рис. 4. Фрагменты поперечных сечений стрендов на разных диаметрах после РТО по режиму: 370°C, 100 ч+665 °C,40 ч.

Как видно из рис. 4, после РТО наблюдается смещение центрального ряда волокон к центру субэлемента в образцах обеих партий. Данный эффект объясняется тем, что на первой стадии РТО (370 °C, 100 ч), которая проводится для превращения Cu и Sn в бронзу, в сверхпроводниках, изготовленных по методу внутреннего источника, вокруг источника Sn формируются ε-фаза (Cu_3Sn) и η-фаза (Cu_6Sn_5) в зоне, более близкой к центру субэлемента [7]. Олово проникает в межволоконное пространство на расстояние 10–20 мкм от первого ряда волокон. На высокотемпературной ступени РТО (665 °C) η-фаза (Cu_6Sn_5), температура плавления которой составляет 415 °C, переходит в жидкое состояние, в этом расплаве тугоплавкие ниобиевые волокна перемещаются преимущественно к центру. За счет разницы скоростей диффузии Cu и Sn начинают возникать поры Киркендалла, которые преимущественно располагаются в зоне бывшего источника Sn (рис. 4) [15]. При этом каждое волокно в процессе высокотемпературной ступени превращается Nb_3Sn аналогично тому, как описано в [11, 16]. Образования тройной Cu-Nb-Sn фазы, богатой оловом (до 68–72 ат.% Sn), не наблюдается.

В слоях, расположенных дальше от источника олова, нарушений в расположении волокон не наблюдается, поскольку там образуются только α-фаза (твёрдый раствор Sn в Cu) и ε-фаза (Cu_3Sn). В этих областях взаимодействие между Nb и Sn протекает по твердофазному механизму, поэтому геометрия волокон сохраняется. Следует отметить, что в отличие от сверхпроводников с распределенным ниобиевым барьером, где в процессе РТО образуется сплошное кольцо сверхпроводящей фазы [17], здесь можно различить отдельные волокна. Это обусловлено изначально большими расстояниями между волокнами, использованием медных разделителей и большей долей меди между волоконной зоной субэлемента и центральным оловом.

Результаты элементного анализа образцов ДТ31 после РТО на диаметрах 1.0 и 0.82 мм показали, что содержание остаточного олова в центре каждого субэлемента составляло 8.5–9 ат. %, тогда как в образовавшемся слое Nb_3Sn концентрация Sn достигала 21–23 ат. %. При уменьшении диаметра сверхпроводника до 0.82 мм концентрация остаточного олова снижается до ~7.5 ат. %, в то время как его содержание в сверхпроводящей фазе увеличивается до 22–24 ат. %.



(а) (б)

Рис. 5. (а) СЭМ — изображение микроструктуры образца ДТ31 на Ø1 мм после РТО по режиму: 370 °C, 100 ч + 665 °C, 40 ч с нанесенными профилями распределения элементов по линии; (б) — исследование элементного состава с помощью МРС анализа (картирование по элементам).

3.3 Исследование электрофизических характеристик

Параметр RRR

Проведены измерения остаточного сопротивления (параметра *RRR*) образцов ДТ19 и ДТ31 после РТО по режиму: 370 °С, 100 ч + 665 °С, 40 ч, его величина составила 252 и 269, соответственно. Анализ полученных результатов свидетельствует о целостности танталового барьера, который предотвращает диффузию олова в медную стабилизацию, и подтверждает результаты металлографических исследований.

Плотность критического тока

Полевая зависимость плотности критического тока на сечение без меди $J_c(B)$ для образца ДТ31 диаметром 0.82 мм после РТО по режиму: 370 °С, 100 ч + 665 °С, 40 ч и значения J_c в магнитном поле 12 Тл при температуре 4.2К для образцов ДТ31 и ДТ19 на диаметрах 1.0 и 0.82 мм, соответственно, представлены на рис. 6.

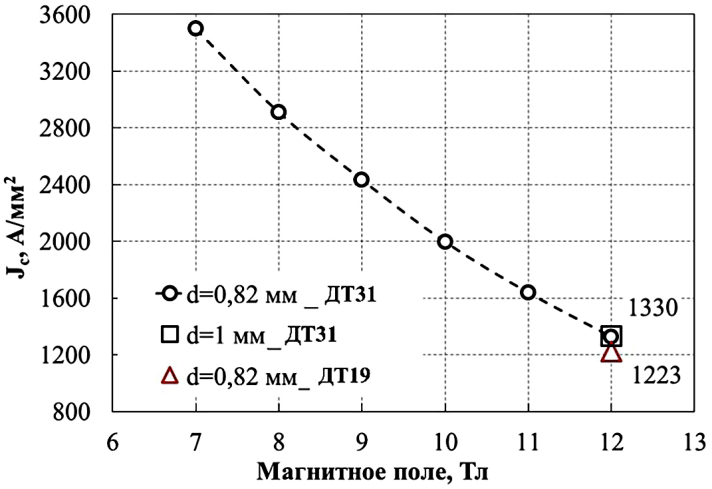


Рис. 6. $J_c(B$, 4.2 К) на сечение без меди сверхпроводника партии ДТ31 Ø 0.82 мм; J_c(12 Тл) партии ДТ31 Ø1.0 мм и ДТ19 Ø0.82 мм после РТО по режиму: 370 °С, 100 ч + 665 °С, 40 ч.

Из приведенных на рис. 6 результатов следует, что увеличение количества субэлементов в сверхпроводнике с 19 до 31 приводит к небольшому росту электрофизических характеристик (~ 8%). Значение J_c в магнитном поле 12 Тл возрастает с 1223 А/мм^2 (для ДТ19) до 1330 А/мм^2 (для ДТ31).

Гистерезисные потери

Одной из характеристик сверхпроводящих материалов, работающих в переменных магнитных полях, являются гистерезисные потери. Их величина определяет стабильность работы сверхпроводника. Гистерезисные потери обусловлены протеканием сверхпроводящих экранирующих токов и определяются, в первую очередь, потерями непосредственно в сверхпроводящих волокнах. Дополнительный вклад вносят потери, вызванные эффектом бриджинга, который индуцирует слабую сверхпроводимость в прилегающих к волокнам областях матрицы. Величина гистерезисных потерь проводника пропорциональна коэффициенту заполнения по сверхпроводнику, скорости изменения магнитного поля, плотности критического тока и диаметру волокон. Пример петли гистерезиса, полученной при циклическом перемагничивании образцов ДТ19 и ДТ31, представлен на рис. 7.

Удельные гистерезисные потери Q_h за цикл равны площади петли гистерезиса:

$$Q_h = \int_{-B_m}^{+B_m} \Delta M(H)\,\mathrm{d}H = \mu_0^{-1}\int_{-B_m}^{+B_m} \Delta M(B)\,\mathrm{d}B, \qquad (1)$$

где: ΔM — ширина петли гистерезиса, B — индукция внешнего магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная ($1.25663706 \cdot 10^{-6}$ Гн/м).

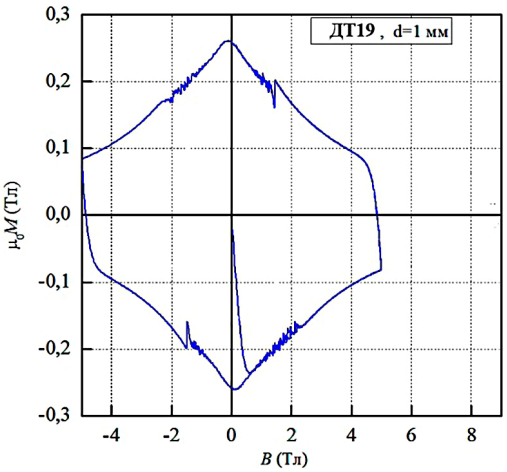


Рис. 7. Петля намагничивания M(B) для образца партии ДТ19.

Как видно из рис. 7 образец ДТ19 имеет выраженные скачки $M(B)$ в диапазоне полей до ±1 Тл (похожие скачки характерны и для образца ДТ31). В соответствии с моделью критического состояния, скачки указывают на то, что вихревые токи при низких полях превышают критическое значение. Была оценена величина гистерезисных потерь проводников ДТ19 и ДТ31 на разных диаметрах (рис. 8).

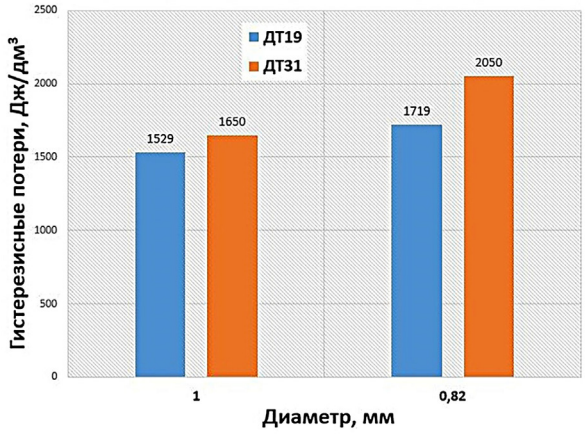


Рис. 8. Зависимость величины гистерезисных потерь от диаметра проводника ДТ19 и ДТ31 после РТО по режиму: 370 °C, 100 ч + 665 °C, 40 ч.

Анализ полученных результатов (рис. 8) показывает, что обе партии имеют высокий уровень гистерезисных потерь. Уменьшение диаметра проводника с 1.0 до 0.82 мм приводит к их росту для обеих партий: для партии ДТ19 — с 1529 до 1719 Дж/дм^3 (прирост ~ 12%), для партии ДТ31 — с 1650 до 2050 Дж/дм^3 (прирост ~ 24%). Кроме того, образцы партии ДТ31 характеризуются более высоким уровнем гистерезисных потерь по сравнению с ДТ19. Это, вероятно, связано с особенностями их микроструктуры, в частности с более плотной упаковкой субэлементов и меньшим межволоконным расстоянием, что было отмечено ранее при анализе геометрических параметров.

В сверхпроводниках, изготовленных методом внутреннего источника олова, эффектив-

ный диаметр волокна D_{eff} связан с диаметром субэлемента D_{sub} и согласно литературным данным $D_{eff} \approx 1.25D_{sub}$ [18]. Однако наблюдаемый рост гистерезисных потерь при близких значениях J_c (разница ~ 8 %) свидетельствует о том, что D_{eff} в исследованных проводниках значительно превышает расчетные значения, соответствующие геометрическому диаметру субэлементов. Это обусловлено, главным образом, эффектом бриджинга, который приводит к электромагнитной связи между соседними волокнами.

Оптимизация количества, размера, расстояния и положения Nb волокон в субэлементе, направленная на минимизацию гистерезисных потерь, осложняется их искажениями в процессе производства. Значительные изменения формы и положения волокон происходят как при обработке металлом давлением (экструзия, волочение), так и в ходе последующей РТО. Важно отметить, что характер этих изменений не является постоянной величиной, а определяется комплексом технологических параметров: исходным составом (соотношение Sn/Cu/Nb), исходным положением волокон в субэлементе и выбранным режимом РТО.

Для оценки влияния медных разделителей на уровень гистерезисных потерь были исследованы партии ВИП4-31 и 2-С4-9а-1-7, содержащие по шесть медных разделителей в каждом субэлементе. Описание конструкции данных партий подробно представлено в работе [17]. Более высокие значения J_c в партиях ВИП4-31 и 2-С4-9а-1-7 закономерно вносят более существенный вклад в увеличение уровня гистерезисных потерь, несмотря на наличие увеличенного (до 6 шт.) количества разделителей. Важно отметить, что использование медных разделителей для разбиения Nb_3Sn волокон в исследованных конструкциях не является эффективным способом снижения гистерезисных потерь. Это может быть связано с тем, что медные разделители, склонны к деформации в процессе волочения и не предотвращают сращивание волокон при увеличении удельного объема, сопровождающем образование фазы Nb_3Sn.

Эффективным способом снижения уровня гистерезисных потерь в многоволоконных Nb_3Sn сверхпроводниках является использование резистивных разделителей, препятствующих электромагнитной связи между волокнами и субэлементами. Как показано в исследовании [8], применение шести разделителей из сплава Cu-Mn в проводниках с 31 субэлементом позволило существенно уменьшить эффективный диаметр волокна, что положительно сказалось на уровне гистерезисных потерь.

4. Выводы

1. Исследовано влияние конструктивных параметров Nb_3Sn сверхпроводников, изготовленных методом внутреннего источника олова, на их микроструктуру и электрофизические характеристики.

2. Установлено, что увеличение количества субэлементов с 19 до 31 в сверхпроводнике диаметром 0.82 мм приводит к росту плотности критического тока J_c в магнитном поле 12 Тл с 1223 до 1330 А/мм^2 (прирост ~ 8 %). Использование общего танталового барьера позволяет достичь высоких значений параметра *RRR* (252–269).

3. Показано, что уменьшение диаметра сверхпроводника сопровождается ростом гистерезисных потерь: для партии ДТ19 увеличение составляет ~ 12 %, что обусловлено эффектом бриджинга.

4. Применение медных разделителей не обеспечивает существенного снижения гистерезисных потерь вследствие их деформации в процессе волочения. Наиболее эффективным подходом к снижению потерь является использование разделителей из резистивных материалов, которые препятствуют возникновению электромагнитной связи между волокнами и позволяют уменьшить эффективный диаметр без критического снижения токонесущей способности.

Благодарности

Авторы благодарят Захарову Галину Александровну, Насибулина Мансура Нурахмето-

вича и Лукьянова Павла Александровича за непосредственное участие в подготовке образцов для исследований и обсуждении полученных результатов.

Литература

[1] Р. Жолудь. Дотянуться до звезд: термоядерные достижения разных стран. Новый атомный эксперт: информационно-аналитическое издание, приложение к журналу «Атомная энергия» **27**, 6 (2025).

[2] X. Li, M. Ainslie, D. Song, W. Yang, R. Macián-Juan, Superconductor Science and Technology **38**, 033001 (2025). DOI: 10.1088/1361-6668/ada9d2

[3] Julia Haack, Arabian Journal for Science and Engeneering **50**, 3233 (2024). DOI:10.1007/s13369-024-08720-4

[4] S.P. Kwon, Progress in Superconductivity and Cryogenics **24**, 7 (2022). DOI: 10.9714/psac.2022.24.2.00.

[5] S.A. Lelekhov, A.V. Krasil'nikov, B.V. Kuteev, I.A. Kovalev, D.P. Ivanov, A.I. Ryazanov, M.I. Surin, S.V. Shavkin, V.S. Vysotsky, L.V. Potanina, G.G. Svalov, I.M. Abdyukhanov, M.V. Alekseev, A.S. Tsapleva, V.I. Pantsyrny, E.R. Zapretilina, I.Yu. Rodin, A.A. Voronova, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 4200305 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2017.2768186

[6] N. Mitchell, J. Zheng, Ch. Vorpahl, V. Corato, Ch. Sanabria, M. Segal, B. Sorbom, R. Slade, G. Brittles, R. Batema, Superconductor science and technology **34**, 103001 (2021). DOI:10.1088/1361-6668/ac0992

[7] M.V. Krylova, I.M. Abdyukhanov, A.S. Tsapleva, et al. The microstructure of Nb_3Sn superconductors differing in the number of copper inserts at various stages of heat treatment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 27th International Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2018, ICEC-ICMC 2018, 2019. – P. 012174.

[8] P.A. Lukyanov, V.I. Pantsyrny, M.V. Polikarpova, V.V. Guryev, D.S. Novosilova, K.O. Bazaleeva, A.S. Tsapleva et al., Journal of Physics: Conference Series **1559**, 012061 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1559/1/012061

[9] V. Pantsyrny, A. Shikov, A. Vorobieva, Cryogenics **48**, 354 (2008). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2008.04.006

[10] I. Abdyukhanov, Internal tin strands designed in RF for application in high field dipoles / I. Abdyukhanov // 2TUP23: poster session presented at the FCC Week 2017, Intercontinental Hotel, Berlin, 30 May 2017. – Berlin, 2017.

[11] Y.G. Shi, K. Zhang, J.W. Liu, B. Wu, H.X. Gao, J.F. Li, X.H. Liu, Y. Feng, P.X. Zhang, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 6001004 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2801321

[12] И.М. Абдюханов, М.В. Алексеев, М.В. Крылова, Р.Т. Алиев, А.С. Цаплева, Е.А. Зубок, А.Г. Силаев, В.И. Панцырный, С.М. Зернов. Патент RU 2770617 «Сверхпроводящий композиционный провод на основе Nb_3Sn». дата опубл. 19.04.2022.

[13] И.М. Абдюханов, М.В. Алексеев, М.В. Крылова, Р.Т. Алиев, А.С. Цаплева , Е.А. Зубок, А.Г. Силаев, В.И. Панцырный, С.М. Зернов, Патент RU 2741783 «Заготовка для изготовления сверхпроводящего композиционного провода на основе Nb_3Sn». дата опубл. 28.01.2021.

[14] V.R. Nazareth. Characterization of the Interdiffusion Microstructure, A15 Layer Growth and Stoichiometry in Tube-Type Nb_3Sn Composites: master's thesis / Vishal Ryan Nazareth; The Ohio State University. – Columbus, 2008.

[15] I. Pong, L.-R. Oberli, L. Bottura, Superconductor Science and Technology **26**, 105002 (2013). DOI: 10.1088/0953-2048/26/10/105002

[16] J. Liu, Y. Shi, B. Wu, K. Zhang, J. Li, X. Liu, Y. Feng, P. Zhang, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 28, 6000305 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2791617

[17] М.В. Крылова. Экспериментальное обоснование конструкции и режимов термообработки Nb_3Sn сверхпроводников для современных ускорителей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 2.6.1 / Крылова Мария Владимировна — Москва, 2022.

— 145 с.
[18] X. Xu, F. Wan, X. Peng, Superconductor Science and Technology **38**, 125024 (2025).

Analysis of Nb_3Sn structural and electrophysical superconductor characteristics under simulated deformation manufactured by the Internal Tin Process

N. V. Konovalova[1,*], I. M. Abdyukhanov[1], A. S. Tsapleva[1], I. I. Savelev[1], M. V. Alekseev[1], K. A. Mareev[1], D. S Novosilova[1]

JSC «Advanced Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A. A. Bochvar», (JSC VNIINM),123098, Moscow, Russia
* e-mail: NViKonovalova@bochvar.ru

The results of a study on multifilamentary Nb_3Sn superconductors fabricated by the internal tin method with a common barrier are presented. Two experimental strand of superconductors, differing in the number of subelements, with diameters of 1.0 mm and 0.82 mm, were manufactured. The influence of design parameters on the microstructure, critical current density, *RRR* parameter, and hysteresis losses was investigated. It was established that an increase in the number of subelements leads to an increase in the critical current density in a magnetic field of 12 T. Decreasing the superconductor diameter distorts the subelement geometry and an increase hysteresis loss. Copper separators was not provide a significant reduction hysteresis losses due to their deformation during the drawing process. The most effective approach to loss reduction is the use of separators made of resistive materials, for example, the Cu-Mn alloy, which prevent electromagnetic coupling between the filaments.

Keywords: superconductor; strand; Nb_3Sn; microstructure; hysteresis losses; internal tin.

Ильдар Мансурович Абдюханов — к. т. н, заместитель генерального директора — директор отделения сверхпроводящих и функциональных материалов АО «ВНИИНМ».

Ildar Mansurovich Abdyukhanov — Ph. D., Deputy Director General — Director of the Department of Superconducting and Functional Materials of JSC VNIINM.

Анастасия Сергеевна Цаплева — к. т. н., начальник лаборатории технологии сверхпроводников на основе интерметаллических соединений АО «ВНИИНМ».

Anastasia Sergeevna Tsapleva — Ph. D., Head of the Laboratory of Superconductor Technology based on Intermetallic Compounds of JSC VNIINM.

Алексеев Максим Викторович — к. т. н., заместитель директора отделения сверхпроводящих и функциональных материалов, начальник управления АО «ВНИИНМ».

Alekseev Maxim Viktorovich — Ph. D., Deputy Director of the Department of Superconducting and Functional Materials, Head of Department of JSC VNIINM.

Надежда Викторовна Коновалова — научный сотрудник лаборатории технологии сверхпроводников на основе интерметаллических соединений АО «ВНИИНМ».

Nadezhda Viktorovna Konovalova — Researcher at the Laboratory of Superconductor Technology based on Intermetallic Compounds of JSC VNIINM.

Илья Игоревич Савельев — научный сотрудник лаборатории технологии сверхпроводников на основе интерметаллических соединений АО «ВНИИНМ».

Ilya Igorevich Savelev — Researcher at the Laboratory of Superconductor Technology based on Intermetallic Compounds of JSC VNIINM.

Константин Алексеевич Мареев — старший научный сотрудник лаборатории технологии сверхпроводников на основе интерметаллических соединений АО «ВНИИНМ».

Konstantin Alekseevich Mareev — Senior Researcher at the Laboratory of Superconductor Technology based on Intermetallic Compounds of JSC VNIINM.

Дарья Сергеевна Новосилова — начальник лаборатории высокотемпературных сверхпроводников АО «ВНИИНМ».

Daria Sergeevna Novosilova — Head of Laboratory of High-Temperature Superconductors, JSC VNIINM.