

Государственный научный центр Российской Федерации
Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский
институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»
(АО «ВНИИНМ»)

Карасёв Юрий Владимирович

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ NbTi
СВЕРХПРОВОДНИКОВ С НИЗКИМИ ПОТЕРЯМИ ДЛЯ
БЫСТРОЦИКЛИРУЮЩИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Губкин Игорь Николаевич

Москва – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В научно-исследовательском центре тяжёлых ионов (Gesellschaft für Schwerionenforschung – GSI) в пригороде Дармштадта (Германия) реализуется мега-проект по сооружению Европейского центра по исследованию ионов и антипротонов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research – FAIR, ФАИР) при международном сотрудничестве 16 государств-партнеров, в число которых входит Россия.

Проект ФАИР нацелен на сооружение не имеющего аналога ускорительно исследовательского комплекса нового поколения, открывающего уникальные возможности для проведения научных исследований по наиболее актуальным направлениям современной науки и технологий: атомная физика, физика плазмы, физика антипротонов, физика ядра и ядерной материи.

Комплекс создается на базе существующих в GSI ускорителей UNILAC и SIS 18 и будет дополнительно включать два больших ускорительных кольца – синхротроны SIS 100 и SIS 300 с периметром 1100 м, расположенных один над другим в подземном тоннеле.

Особенностью работы магнитных систем синхротронов SIS 100 и SIS 300 является то, что их сверхпроводящие магниты на основе NbTi сверхпроводников должны работать в режиме изменения магнитного поля соответственно со скоростью 4 Тл/с до амплитуды 2 Тл и со скоростью 1-1,5 Тл/с до амплитуды 6 Тл.

Основной проблемой при разработке быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов является повышенное тепловыделение, зависящее, главным образом, от образующихся тепловых потерь в обмотке магнита при изменении магнитного поля.

В связи с чем возникла необходимость разработки сверхпроводящих NbTi проводов нового класса, конструкция которых должна обеспечить сочетание высокой токонесущей способности и минимально возможных энергетических потерь при сохранении достаточной стабильности, а технология их изготовления позволила бы достичь требуемых строительных длин. Необходимость разработки сверхпроводящих NbTi проводов для ускорителя ФАИР, не имеющих аналогов по комплексу требований, определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы.

Целью работы является разработка и исследование структуры, рабочих характеристик и технологических особенностей получения сверхпроводящих NbTi проводов нового класса с высокой токонесущей способностью и низким уровнем энергетических потерь применительно к условиям работы быстроциклирующих магнитов ускорительного комплекса ФАИР.

Для достижения поставленной цели предполагалось решить следующие задачи:

- исследовать интенсификацию процесса деформации при обработке слитков и изготовлении прутков-сердечников из сплава НТ-47 и диффузионных барьеров из ниобия и изучить эволюцию изменения структурного состояния;

- исследовать свойства медного сплава Cu-0,5 Mn, как неординарного резистивного материала межволоконной матрицы сверхпроводников;
- провести последовательную разработку вариантов конструкций NbTi проводов нового класса, способов и режимов изготовления, исследовать их рабочие характеристики и технологические особенности получения;
- по результатам выполняемых исследований и взаимодействия с разработчиками магнитов уточнить параметры NbTi проводов и обеспечить их реализацию;
- выбрать и оптимизировать конструкции, а также разработать технологию изготовления NbTi проводов с низкими потерями для реализации в условиях опытно-промышленного и промышленного производства;
- изготовить партии NbTi проводов с низкими потерями для прототипов быстроциклирующих магнитов синхротронов SIS 100 и SIS 300 ускорительного комплекса ФАИР.

Научная новизна работы.

В диссертационной работе впервые:

1. Представлены результаты по деформационному упрочнению и эволюции структуры сверхпроводящего сплава HT-47 в деформированном состоянии и после отжига в интервале температур 400-700 °С, полученные с применением интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП) заготовок размером Ø32×60 мм.
2. Усовершенствована технологическая схема получения заготовок из промышленных слитков сплава HT-47 конической формы путём введения операции осадки слитка на сферическую шайбу, реализованная при изготовлении прутков диаметром 89 мм со средним размером зерна 40 мкм на ½ радиуса прутка из слитка размером Ø150×Ø178×450 мм.
3. С применением операцииковки и прессования разработаны технологические схемы получения прутков сплава HT-47 диаметром 85 мм и 108 мм со средним размером зерна во всем сечении 50 мкм и 64 мкм из цилиндрических слитков диаметром 320 мм.
4. Разработан новый тип тонкостенного диффузионного барьера – многослойный барьер из тонколистового ниобия для изготовления одноволоконных заготовок Cu-0,5 Mn/NbTi/Nb.
5. Разработан и изготовлен по методу однократной сборки модельный NbTi провод в комбинированной Cu/Cu-Ni матрице нового класса диаметром 0,65 мм для работы в условиях изменяющегося магнитного поля со скоростью до 4 Тл/с.
6. Экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность изготовления по методу двукратной сборки NbTi проводов нового класса диаметрами 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице для работы в быстроциклирующих магнитах ускорительного комплекса ФАИР.
7. В опытно-промышленных и промышленных условиях изготовлены партии NbTi проводов диаметром 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице,

отвечающие требованиям, предъявляемым к проводам для быстроциклирующих магнитов синхротронов SIS 100 и SIS 300 ускорительного комплекса ФАИР.

Практическая значимость.

Установлено, что сверхпроводящий сплав НТ-47 при РКУП выдерживает восемь последовательных ходов прессования с суммарной истинной степенью деформации 9,20, обеспечивающей при последующем отжиге однородную структуру с размером зерна ≤ 1 мкм во всем сечении заготовки.

Разработанная усовершенствованная технологическая схема изготовления прутков с однородной мелкозеренной структурой из конического слитка сплава НТ-47 размером $\varnothing 150 \times \varnothing 178 \times 450$ мм применена при получении прутков диаметром 83 мм для изготовления опытных NbTi проводов в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице.

На АО ЧМЗ для изготовления NbTi сверхпроводящих проводов внедрены разработанные технологические схемы получения прутков сплава НТ-47 диаметром 85-108 мм с однородной мелкозеренной структурой из цилиндрических слитков диаметром 320 мм с использованием операции ковки и операции прессования.

Разработана и реализована технологическая схема получения длинномерных листов ниобия толщиной $\sim 0,26$ мм с однородной мелкозеренной структурой и повышенными прочностными характеристиками при требуемой пластичности и высоком качестве поверхности.

Разработана конструкция однократной сборки сотового типа для изготовления провода диаметром 0,65 мм в комбинированной Cu/Cu-Ni матрице с низкими потерями из заготовки промышленного масштаба диаметром 250 мм и подтверждена ее реализуемость на модельном проводе.

Разработаны два варианта конструкции двукратной сборки и технология изготовления NbTi проводов диаметром 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице с низкими потерями для работы в условиях изменяющегося магнитного поля со скоростью до 4 Тл/с. Выпущены представительные партии проводов с низкими потерями для магнитной системы ускорителя ФАИР.

На защиту выносятся:

- результаты исследований структуры и деформационного упрочнения прутков из сплава НТ-47, обработанных методом РКУП;

- результаты исследований, направленных на получение однородной мелкозеренной структуры в заготовках промышленного масштаба из сплава НТ-47, а также технологические схемы получения прутков сплава НТ-47 диаметром 85-108 мм из конического слитка диаметром 150×178 с использованием операции осадки на сферическую шайбу и из цилиндрического слитка диаметром 320 мм с использованием операции ковки и операции прессования;

- результаты исследования, направленного на получение однородной мелкозеренной структуры в ниобиевом диффузионном барьере, применяемом при производстве сверхпроводников, и разработка многослойного диффузионного барьера из тонколистового ниобия толщиной 0,26 мм;

- результаты исследований структуры, механических и электрофизических свойств медного резистивного сплава Cu-0,5 Mn, применяемого в качестве межволоконной матрицы в проводниках, предназначенных для работы при изменяющемся магнитном поле;

- результаты исследования по влиянию параметров NbTi проводов в медной матрице на токовые характеристики и энергетические потери;

- конструкции и результаты исследования NbTi проводов с низкими потерями диаметром 0,65 мм в комбинированной Cu/Cu-Ni матрице и диаметром 0,5-0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице;

- конструкции и технология изготовления NbTi проводов диаметром 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице для быстроциклирующих магнитов, работающих в условиях изменения магнитного поля со скоростью до 4 Тл/с.

Личный вклад автора.

Автор активно участвовал в постановке задач и выборе методов исследования. Лично участвовал в разработке конструкций и технологий изготовления NbTi проводов и полуфабрикатов, используемых при их производстве. Разработал инструмент для исследования сплава НТ-47 методом РКУП и технологию изготовления многослойного барьера из ниобия. Выполнил структурные исследования, провел обработку экспериментальных данных и анализ результатов рабочих характеристик и технологических особенностей получения NbTi проводов нового класса. Лично участвовал в опробовании и внедрении на производстве АО ЧМЗ технологии изготовления NbTi проводов в комбинированной Cu/Cu-0,5 Mn матрице, а также технологических схем получения прутков сплава НТ-47 из слитков увеличенного размера – диаметром 320 мм.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 12 международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии», Санкт-Петербург, 2009 г.; Семинаре FRRC «Вклад молодых ученых России в проект FAIR», ИТЭФ, Москва, 9-10 июня 2009 г. и 6-9 апреля 2010 г.; Всероссийской научно-технической конференции, «Материалы ядерной техники» (МАЯТ – 2010), Краснодарский край, г. Туапсе 26 сентября-02 октября 2010 г.; Объединенной Школе – семинаре молодых ученых имени Гельмгольца и Росатома FAIR, Австрия, Хиршег, 12-17 февраля 2011 г.; Молодежной Школе – Семинаре «Вклад молодых ученых России в проект FAIR», ИТЭФ, Москва, 21-22 июня 2011 г. и 8-9 ноября 2012 г.; Конференции по криогенной инженерии / Международной конференции по криогенным материалам (СЕС/ICMS 2013), США, Аляска, Анкоридж 17-21 июня 2013 г.; 1-ой национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (НКПС – 2011), Москва 06-08 декабря 2011 г.; 2-ой национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (НКПС – 2013), Москва 26-28 ноября 2013 г.; 3-ей национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (НКПС – 2015), Москва 25-26 ноября 2015 г.;

Международной конференции по прикладной сверхпроводимости 2014, США, Северная Каролина, Шарлотт, 10-15 августа 2014 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Материалы ядерной техники» (МАЯТ – 2014), Московская область, г. Звенигород 7-9 октября 2014 г.

По результатам работы оформлены: Акт о промышленном внедрении на предприятии АО Чепецкий Механический Завод, Акт о промышленном опробовании на предприятии АО Чепецкий Механический Завод, Акт о практическом использовании на предприятии ФГБУ ГНЦ ИФВЭ и патент РФ на полезную модель № 149395 «Сверхпроводящий провод с низкими энергетическими потерями».

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, включая 7 из перечня ВАК (6 статей и 1 патент РФ), из них 1 в международной базе цитирования Scopus, и 8 тезисов докладов в трудах международных и всероссийских конференций.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 66 наименований. Общий объём работы составляет 196 страниц печатного текста, включая 94 рисунка, 32 таблицы, 22 формулы и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературы. Рассмотрена фазовая диаграмма системы Nb-Ti, представлены основные свойства сверхпроводящего NbTi сплава и проводов, изготовленных на его основе для ускорительной техники. Приведены современные представления о взаимосвязи структурных и электрофизических характеристик NbTi композиционных проводов.

Все виды потерь в проводах связаны с условиями работы и их конструкцией. Поскольку такие рабочие характеристики, как температура, магнитное поле и скорость его изменения определяются условиями работы магнитов ускорителя, а температурный запас и критическая плотность тока определяются разработчиками магнитов, причём последняя должна быть максимально возможной, то снижение энергетических потерь в проводах может быть достигнуто за счёт уменьшения диаметра волокон, обеспечения геометрической однородности сечения волокон, уменьшения шага скрутки и обеспечения оптимального межволоконного расстояния за счет толщины или величины удельного сопротивления матрицы в межволоконном пространстве, что должно быть учтено при их конструировании.

Рассмотрен технологический процесс изготовления NbTi сверхпроводников и его основные технологические факторы, которые необходимо учитывать для достижения высокой токонесущей способности. Представлено современное понимание механизмов трансформации структуры материала для создания в NbTi

волокнах регулярной гетерогенной структуры, ответственной за обеспечение высокой критической плотности тока.

В России усилиями предприятий АО «ВНИИНМ», АО «ТВЭЛ» и АО ЧМЗ Госкорпорации «Росатом» для проекта ИТЭР разработана и внедрена промышленная технология изготовления композиционного сверхпроводящего NbTi провода (стренда) однократной сборки. Стренд диаметром 0,73 мм состоит из 4488 волокон сплава НТ-47 диаметром 6,7 мкм и шагом скрутки 15 мм, каждое из которых окружено диффузионным барьером из ниобия и заключено в матрицу из меди.

Принципиальная особенность Российской технологии заключается в том, что она имеет замкнутый технологический цикл – от получения исходных материалов до изготовления и поставки заказчику готового аттестованного сверхпроводящего провода, т.е. в импортонезависимости.

На момент начала настоящей работы в отечественной промышленной технологии изготовления сверхпроводящих NbTi проводов использовали прутки-сердечники сплава НТ-47 диаметром 75-85 мм, получаемые из конических слитков диаметром 150×178 мм и диаметром 180×197 мм, и диффузионные барьеры из ниобия в виде свернутого в обечайку листа или трубы, получаемые из цилиндрических слитков диаметром 150-180 мм и 250 мм соответственно.

Несмотря на успешный выпуск ~ 120 тонн NbTi стренда для проекта ИТЭР, качество используемых полуфабрикатов и стоимость их производства могли быть не достаточными для обеспечения требуемого комплекса свойств в NbTi проводах нового класса с существенно меньшим диаметром волокна и шагом их скрутки. Используемые технологические схемы изготовления не обеспечивали однородную и мелкозеренную рекристаллизованную микроструктуру во всем сечении NbTi прутков-сердечников и диффузионных барьеров из ниобия, необходимую для повышения их деформационной способности. Для получения качественных проводов с высокой геометрической однородностью волокон при их диаметре менее 7 мкм целесообразно было провести исследования по совершенствованию структурного состояния отечественных полуфабрикатов из сплава НТ-47 и ниобия.

Предварительные требования к проводу для быстроциклирующих магнитов ускорителя ФАИР в медной матрице приведены в таблице 1.

Таблица 1. Предварительные требования к проводу для быстроциклирующих магнитов ускорителя ФАИР в медной матрице.

№ п/п	Параметр провода	Значение
1	Диаметр провода, мм	0,50 - 0,65
2	Отношение Cu/поп Cu	1,8
3	Диаметр волокон, мкм	3,5 → 2,5
4	Шаг скрутки, мм	4 → 2
5	Плотность критического тока в поле 5 Тл при температуре 4,2 К, А/мм ²	→ 3000
6	Энергетические потери	min
7	Стоимость провода	min
8	Материал матрицы	Cu с высоким RRR

Неопределенность в преобладании гистерезисных или кооперативных потерь в проводе, отвечающем данным требованиям, вносит неоднозначность в подходах к его изготовлению. Одни специалисты связывают максимальный вклад в энергетические потери с потерями на гистерезис, и поэтому следует рассмотреть возможность уменьшения диаметра волокна до 2,5 мкм. Другие считают, что достаточно иметь диаметр волокна около 6 мкм и обеспечить, как можно меньший шаг скрутки < 4 мм для минимизации кооперативных потерь.

Учитывая неопределенности в предварительных требованиях к проводу нового класса и то, будут ли достигнуты при его использовании ожидаемые характеристики прототипа дипольного магнита, а также необходимость оценки возможности изготовления провода, соответствующего заданным требованиям в комплексе, и решения ряда вопросов по производству отечественных полуфабрикатов для NbTi сверхпроводников, в диссертационной работе проведена последовательная разработка конструкции и технологии изготовления NbTi сверхпроводников с низкими потерями для быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов ускорительной техники.

Во второй главе приведены исследованные материалы и их способы получения. Объектом исследования являются: заготовки сплава НТ-47, обработанные методом РКУП; прутки сплава НТ-47, полученные по разным деформационным схемам с использованием: осадки конического слитка размером $\varnothing 150 \times \varnothing 178 \times 450$ мм,ковки и прессования цилиндрических слитков размером $\varnothing 320 \times 850-900$ мм; диффузионные барьеры из ниобия; материал межволоконной матрицы; модельные образцы NbTi проводов в медной матрице; модельный NbTi провод в комбинированной Cu/Cu-Ni матрице; NbTi провода в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице.

Описаны методики исследований, включая металлографический анализ, исследование гомогенности, определение твердости и механических свойств, контроль технических характеристик композиционных NbTi проводов (диаметр, шаг и направление скрутки, коэффициент заполнения и отношение объемов медной и не медной составляющих) и определение электрофизических характеристик композиционных NbTi проводов (критический ток, параметр « n » и критическая плотность тока, относительное остаточное сопротивление, энергетические потери).

Третья глава посвящена результатам исследования получения однородной мелкозеренной структуры в NbTi прутках-сердечниках и Nb диффузионном барьере, изготавливаемых в условиях АО «ВНИИНМ» и АО ЧМЗ, за счет интенсификации процесса деформации. Кроме того, представлены результаты исследования структуры и свойств резистивного сплава Cu-0,5 Mn, который использован вместо высокочистой меди в качестве материала межволоконной матрицы в проводах для работы в изменяющихся магнитных полях.

Для оценки предельного уровня измельчения зерна в заготовках сплава НТ-47 проведено исследование деформационного упрочнения сверхпроводящего сплава НТ-47 на впервые обработанных заготовках размером $\varnothing 32 \times 60$ мм с применением интенсивной пластической деформации – методом РКУП в специально

изготовленном инструменте с углом матрицы 90° и изучена трансформация структуры, как после последовательных ходов прессования 1, 2, 4, 6 и 8, соответствующих истинным степеням деформации 1,15; 2,30; 4,60; 6,90 и 9,20, так и при последующем отжиге в интервале температур 400-700 °С.

В процессе обработки РКУП растрескиваний и расслоений сплава НТ-47 не выявлено. Деформационное упрочнение происходит интенсивно при увеличении истинной деформации до 2,30. Микротвердость возрастает с 115 до 154 кг/мм². Дальнейшее увеличение деформации до 9,20 приводит к незначительному увеличению микротвердости до 165 кг/мм². Структурное состояние сплава при этом последовательно изменяется от структуры частичной рекристаллизации в исходной заготовке до практически совершенной и однородной деформационной структуры после 8 ходов РКУП. Влияние температуры отжига на микротвердость и структуру образцов сплава НТ-47 после обработки методом РКУП представлено на рис. 1.

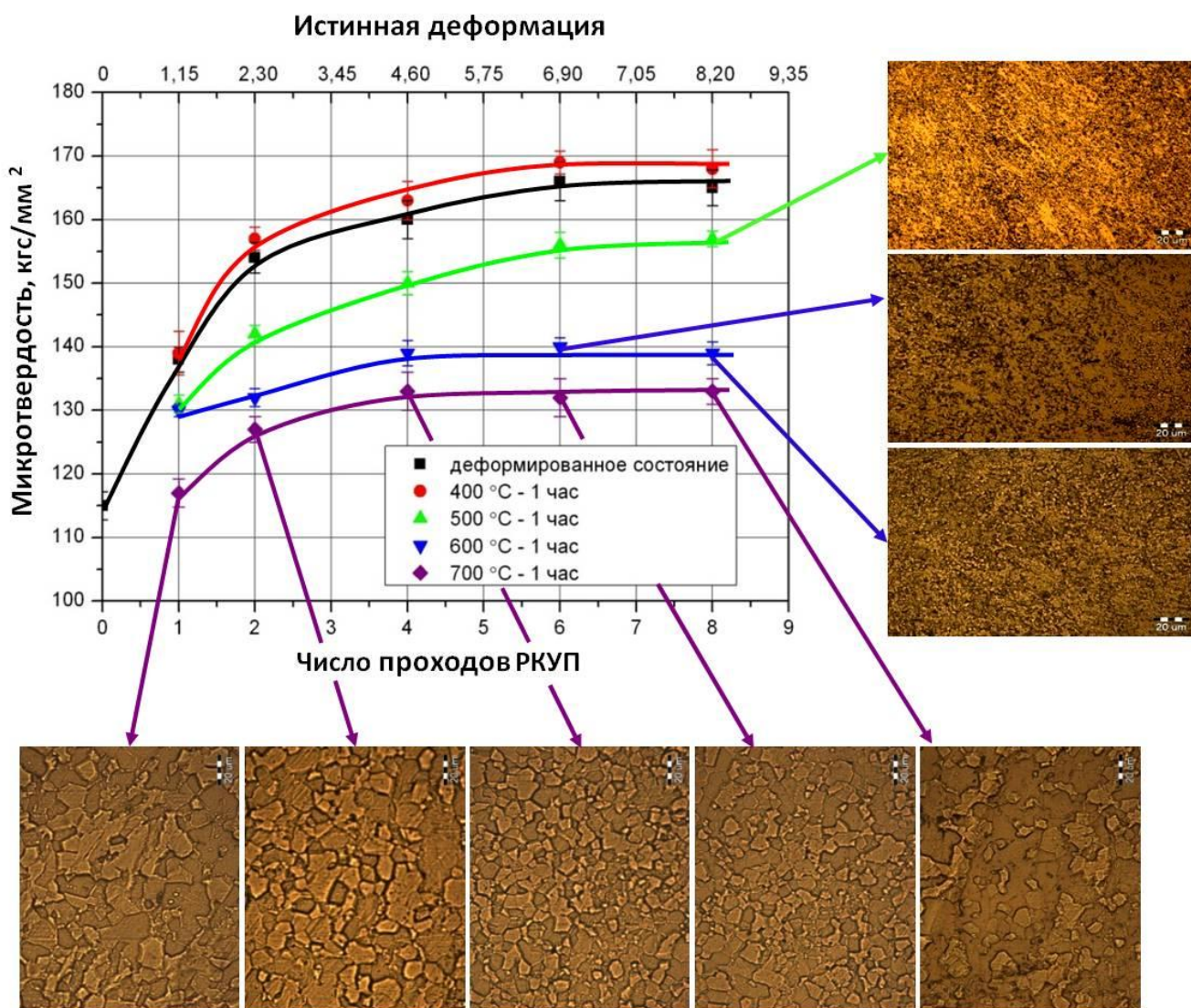


Рис. 1. Изменение микротвердости и микроструктура рекристаллизации сплава НТ-47 в продольно-вертикальном сечении в зависимости от числа проходов при РКУП и температуры последующей термообработки.

Установлено, что в сплаве НТ-47 после шести ходов (деформация 6,90) и отжига при температуре 600 °С во всем сечении заготовки формируется однородная полностью рекристаллизованная структура с размером зерна ≤ 1 мкм, что в 50 раз меньше чем в исходном состоянии. При температуре отжига 700 °С после всех ходов прессования во всем сечении заготовки наблюдается структура рекристаллизации с размером зерна в интервале 3-10 мкм.

Отмечая преимущества методов интенсивной пластической деформации в получении прутков сплава НТ-47 с особой структурой и свойствами, в частности перспективу усовершенствованного процесса РКУП – равноканального многоугольного прессования (РКМУП), преимуществом которого является возможность интегрирования в существующий процесс прессования, волочения и др., следует указать и на то, что для его реализации в промышленных условиях необходимо разработать и изготовить специальный прессовый инструмент и оснастку. В отсутствии такого оборудования для совершенствования структурного состояния прутков сплава НТ-47 за счет увеличения деформации были изучены и последовательно реализованы возможности штатного оборудования.

Исследовано структурное состояние прутка сплава НТ-47 диаметром 89 мм, полученного из конического слитка размером $\varnothing 150 \times \varnothing 178 \times 450$ мм по разработанной усовершенствованной схеме с использованием операции осадки слитка на сферическую шайбу (рис. 2).

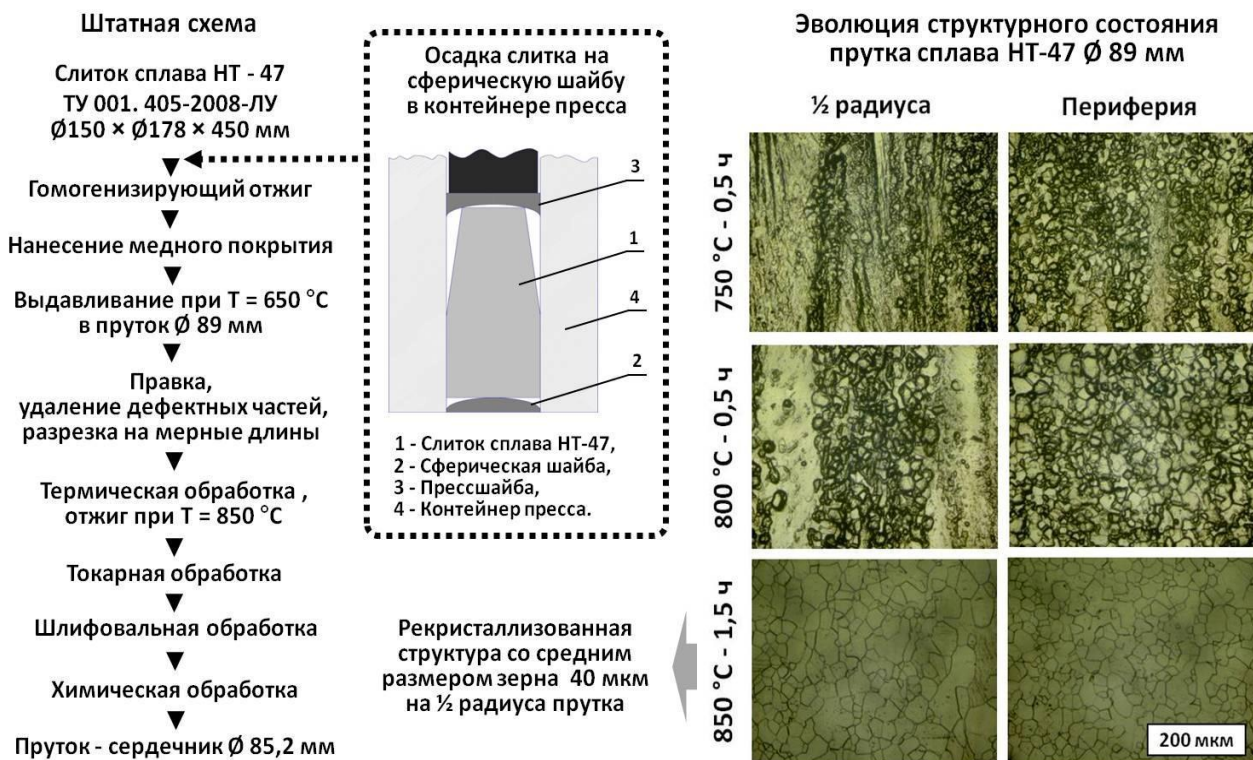


Рис.2. Получение прутков сплава НТ-47 с использованием операции осадки конического слитка на сферическую шайбу и их структурное состояние.

После отжига 850 °С – 1,5 ч следы деформируемой структуры полностью исчезают. За счет выравнивания деформации в центральных и периферийных слоях прессуемой заготовки улучшается однородность проработки на всей длине и в поперечном сечении материала большая часть зерен (> 80 %) имеет мелкозеренную рекристаллизованную структуру со средним размером зерна ~ 40 мкм на $\frac{1}{2}$ радиуса прутка. В прутках, получаемых по штатной технологической схеме, мелкозеренная рекристаллизованная структура формируется только на $\frac{1}{4}$ радиуса.

Для полной проработки материала введение операции осадки конического слитка в контейнере прессы оказалось не достаточным. Поэтому работы в направлении получения мелкого равномерного зерна во всем сечении прутка за счет увеличения деформации были продолжены.

Исследовано структурное состояние прутков сплава НТ-47 диаметрами 108 мм и 89 мм, изготовленных по разработанным технологическим схемам соответственно с применением операций ковки и прессования из впервые выплавленных цилиндрических слитков сплава НТ-47 диаметром 320 мм (рис.3).

Увеличение размера слитка и разработанные технологические схемы получения прутков диаметром 108 мм и 89 мм соответственно с применением операции ковки на ковочном комплексе OFL-12 MN (1) и прессования на прессе усилием 6000 т.с (2), включающие режимы гомогенизирующего отжига, ковки, прессования и отжиг при температуре 850 °С, приводят к полной проработке получаемого материала и формированию во всем сечении прутков полностью рекристаллизованной структуры со средним размером зерна соответственно 60 мкм и 50 мкм.

Полученные прутки представляют собой однородный, гомогенный материал, со структурой и твёрдостью, удовлетворяющими требованиям к материалам, используемым в технологии изготовления сверхпроводящих NbTi проводов, и по структурному состоянию превосходят прутки диаметром 89 мм, изготавливаемые по штатной схеме при производстве стрендов для проекта ИТЭР.

Выход годного при изготовлении прутков диаметром 85-89 мм с применением операции прессования из цилиндрических заготовок размером $\varnothing 297 \times 700-760$ мм (слитков после токарной обработки) на 4-5 % выше, чем при изготовлении из штатного конического слитка размером $\varnothing 180 \times \varnothing 197 \times 600$ мм. При этом производительность процесса выше в 2,5-3 раза.

Наличие прутка сплава НТ-47 диаметром 108 мм с регламентированной структурой обеспечивает возможность изготовления триметаллического прутка Cu/Nb/NbTi из заготовки большего размера – $\varnothing 130 \times 490$ мм, что приводит к повышению производительности процесса в 1,4 раза.

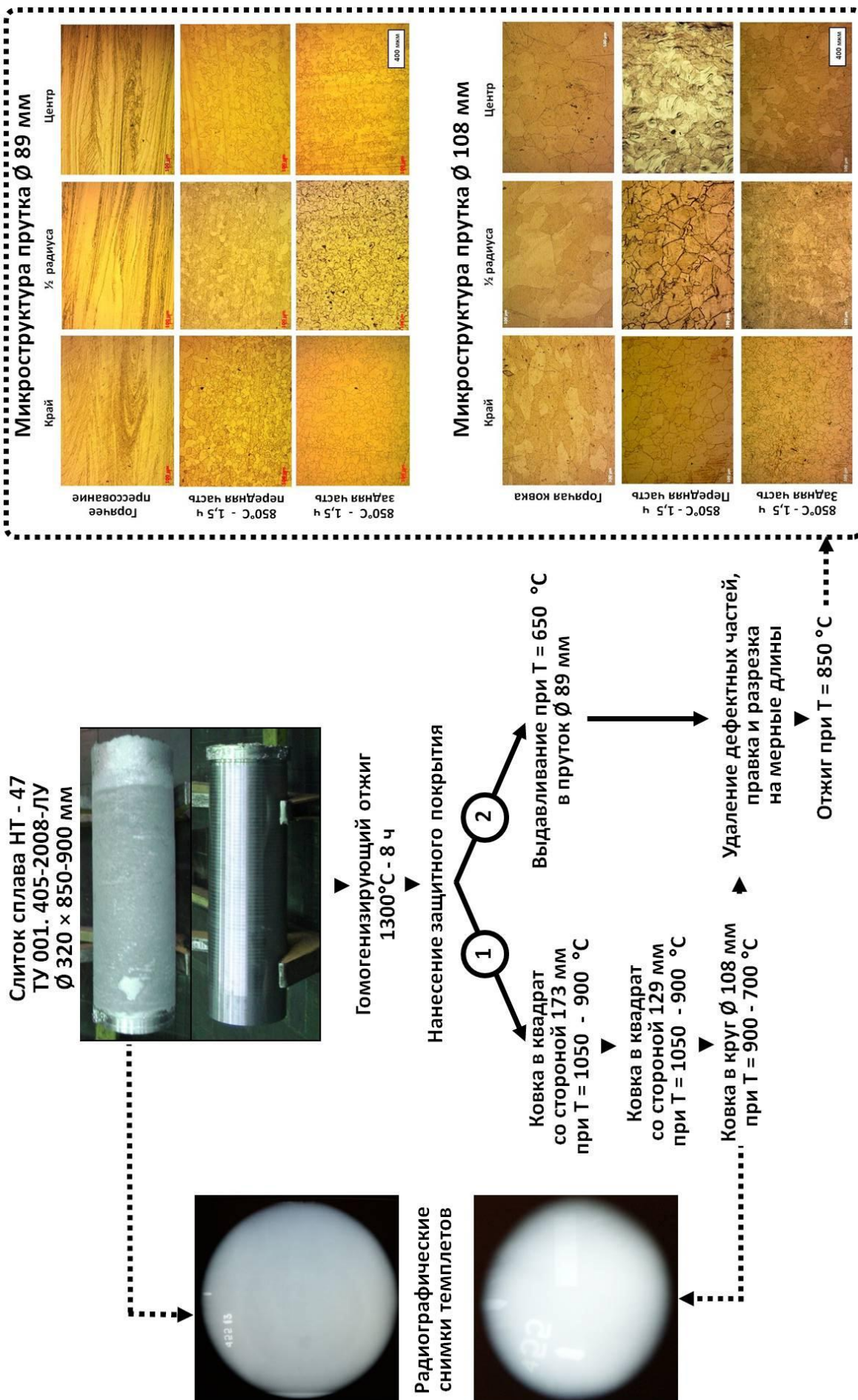


Рис.3. Получение прутков сплава НТ-47 из исходных / обточенных слитков диаметром 320 / 297 мм и их структурное состояние: 1 – с применением операцииковки, 2 – с применением операции прессования.

Исследованы свойства впервые выпущенных в условиях АО «ВНИИНМ» листов из ниобия (марки Нб-1, ТУ 001.395-2006-ЛУ) толщиной 0,26 мм для изготовления многослойного диффузионного барьера (рис. 4.).

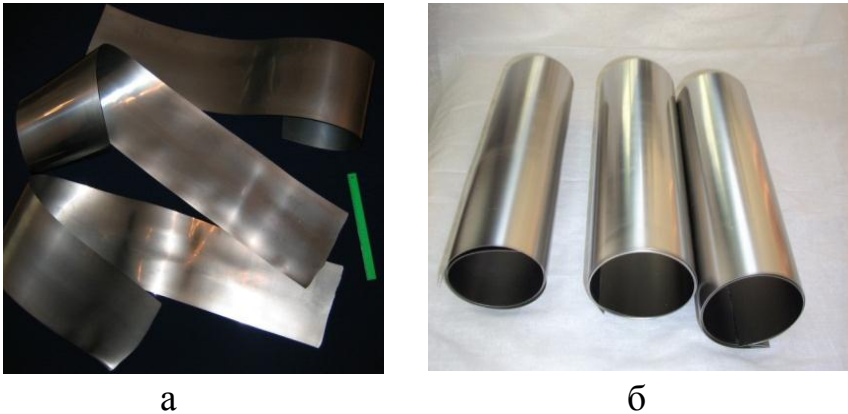


Рис. 4. Многослойный диффузионный барьер из ниобия: а – листы размером 1500×240×0,26 мм, б – вид пятислойных барьеров перед сборкой.

Увеличение пространства деформации и разработанные режимы деформации с промежуточными отжигами делают возможным получение полностью рекристаллизованной структуры и однородной микротвердости во всем сечении листа (рис. 5.).

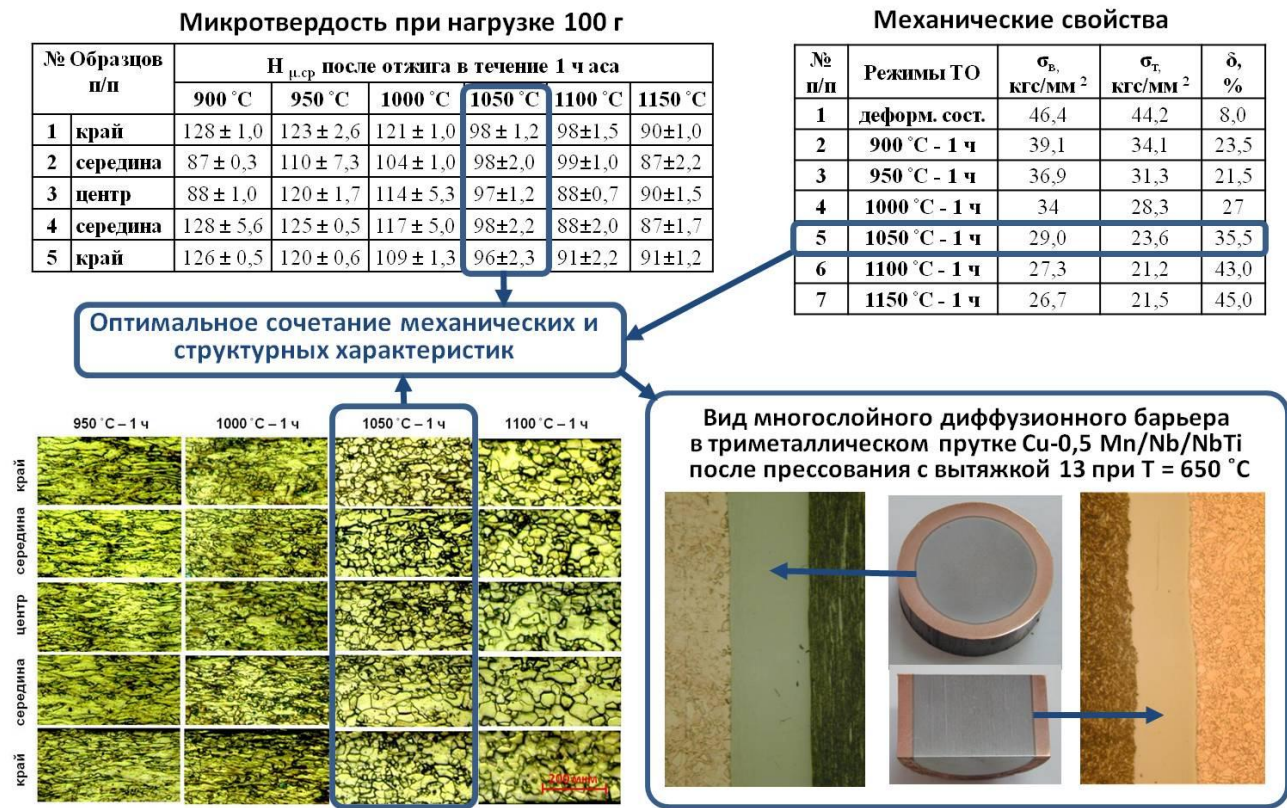


Рис. 5. Характеристики многослойного диффузионного барьера из ниобия и его вид в прессованном триметаллическом прутке Cu-0,5 Mn/Nb/NbTi диаметром 26 мм.

Определен режим рекристаллизационного отжига $1050\text{ }^{\circ}\text{C} - 1\text{ ч}$, обеспечивающий в листах из ниобия толщиной $0,26\text{ мм}$ оптимальное сочетание механических и структурных характеристик: полностью рекристаллизованную структуру со средним размером зерна 28 мкм , однородную микротвердость по сечению листа при нагрузке 100 г на уровне 98 единиц, $\sigma_T = 231,3\text{ МПа}$, $\sigma_B = 284,2\text{ МПа}$ и $\delta = 36\text{ \%}$.

По структурному состоянию и прочностным характеристикам изготовленные листы из ниобия толщиной $0,26\text{ мм}$ превосходят лист толщиной $1,0-1,2\text{ мм}$ (после отжига $1150\text{ }^{\circ}\text{C} - 1\text{ ч}$ σ_B и $\sigma_{0,2}$ для него соответственно составляют $200-240\text{ МПа}$ и $130 - 180\text{ МПа}$) и трубу толщиной $1,0\text{ мм}$ (после отжига $1100\text{ }^{\circ}\text{C} - 1\text{ ч}$ σ_B и $\sigma_{0,2}$ для неё соответственно составляют 220 МПа и 123 МПа , а $\delta = 34\text{ \%}$), используемые в качестве диффузионных барьеров.

В триметаллических прутках $\text{Cu}-0,5\text{ Mn/Nb/NbTi}$ после прессования при температуре $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ с вытяжкой 13 обеспечивается сварка слоев многослойного диффузионного барьера. Границы раздела между слоями ниобиевого барьера не удается выявить даже глубоким травлением, что говорит о качественной сварке между ними.

Поскольку резистивный сплав $\text{Cu}-0,5\text{ Mn}$ в промышленных условиях не выпускается, то перед использованием этого нового материала в производстве сверхпроводников были исследованы его механические и электрофизические свойства. В опытном цехе АО «ВНИИНМ» индукционно-вакуумной плавкой были выплавлены слитки размером $\varnothing 180 \times 385\text{ мм}$, из которых были получены чехлы под триметаллические заготовки для изготовления NbTi проводов в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице для прототипов магнитов синхротронов SIS 300 и SIS 100 ускорителя ФАИР. Свойства и структура сплава $\text{Cu}-0,5\text{ Mn}$ представлены на рис. 6.

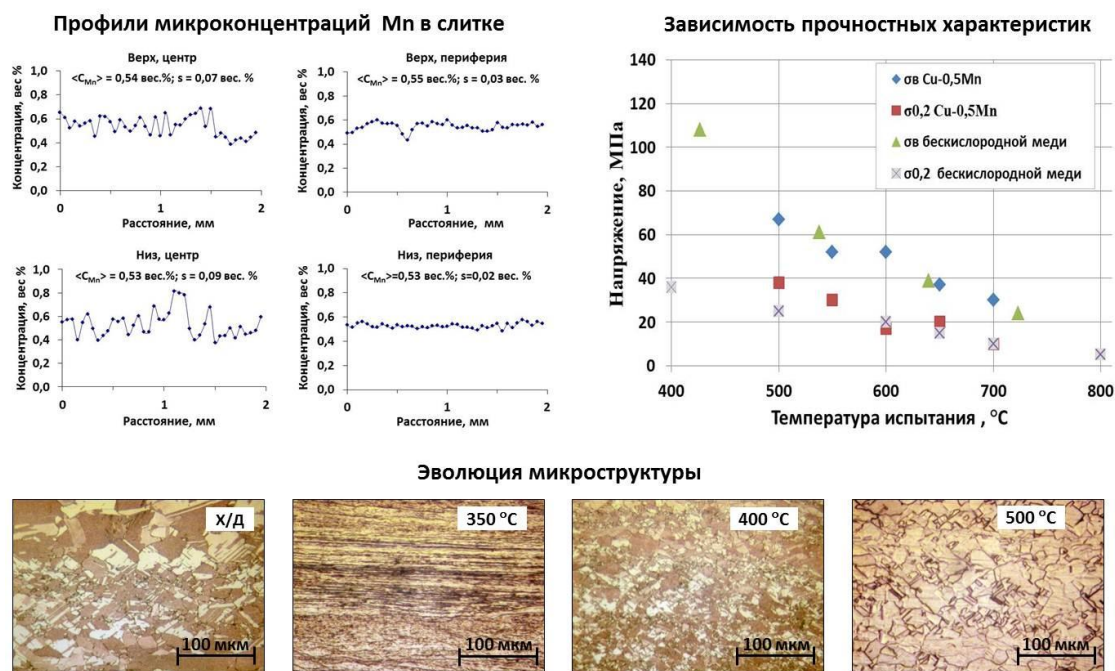


Рис. 6. Свойства и структура сплава $\text{Cu}-0,5\text{ Mn}$.

Полученный сплав Cu-0,5 Mn имеет высокую однородность распределения марганца с малыми отклонениями локальных значений концентраций марганца от средней величины. После отжига 500 °С происходит практически полная рекристаллизация с образованием полиэдрической структуры с множеством двойников отжига. Введение 0,5 мас. % марганца в медную матрицу незначительно увеличивает временное сопротивление, как в холоднодеформированном, так и отожжённом при температуре 500 °С состояниях. Временное сопротивление и предел текучести образцов меди и сплава Cu-0,5 Mn при испытаниях в интервале температур от 550 °С до 650 °С практически совпадают. Удельное электросопротивление резистивного сплава Cu-0,5 Mn при температуре 293 К и при температуре 4,2 К составляет соответственно 3,42 мкОм×см и 1,70 мкОм×см. Удельное сопротивление при криогенной температуре сплава выше, чем у исходной меди, примерно на два порядка.

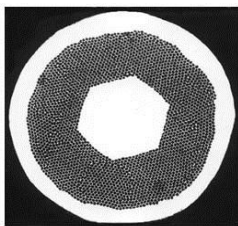
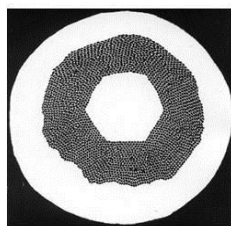
В четвертой главе представлены результаты последовательной разработки и исследования NbTi сверхпроводящих проводов с низкими потерями для магнитов ускорителя ФАИР.

При разработке конструкции и технологии изготовления проводов нового класса для ускорителя ФАИР предстояло определить достигаемый комплекс свойств, включая уровень критической плотности тока, потерь энергии, шаг скрутки и другие параметры. Поэтому, прежде чем приступить к разработке конструкций и технологии изготовления проводов для ускорителя ФАИР были проведены исследования по влиянию межволоконного расстояния, диаметра волокна, шага скрутки на токовые характеристики и общие энергетические потери на модельных образцах NbTi проводов в медной матрице с разным межволоконным расстоянием. Параметры и геометрия поперечного сечения образцов приведены в таблице 2.

Модельные образцы были изготовлены из одного 2344-волоконного композиционного прутка с отношением межволоконного расстояния к диаметру волокна $s/d = 0,15 \pm 0,02$, обеспечивающим получение качественного композиционного провода. Режимы термической обработки разрабатывали таким образом, чтобы они обеспечивали получение близких значений критической плотности тока во всех образцах. Результаты исследования модельных образцов NbTi проводов в медной матрице представлены на рис. 7.

При диаметре волокна менее 6 мкм межволоконная матрица из чистой меди не предотвращает электромагнитного взаимодействия волокон, что приводит к их «спариванию», увеличению эффективного диаметра и, следовательно, к значительному увеличению гистерезисных потерь не только в полях до 1 Тл, но и в более высоких полях. Для подавления электромагнитного взаимодействия волокон в NbTi проводах с диаметром волокна менее 6 мкм и, в частности, в проводах с диаметром волокна менее 3,5 мкм для ускорителя ФАИР, необходимо введение межволоконной матрицы из медного сплава с более высоким сопротивлением.

Таблица 2. Параметры модельных образцов NbTi проводов в медной матрице.

Параметры	Образец № 1 *	Образец № 2 **	Образец № 3 ***
Поперечное сечение			
Диаметр провода, мм	0,73	0,5	0,5
Диаметр волокна - d, мкм	9,8	6,7	5,2
Расстояние между волокнами - s, мкм	1,50	1,03	0,80
Отношение s/d	0,15	0,15	0,15
Число волокон	2346	2346	2346
Отношение Cu/не Cu (расчетный КЗ)	1,39 (0,417)	1,39 (0,417)	3,00 (0,25)
Шаг скрутки, мм	6,5	2,2; 3,6; 4	4
Метод сборки	Однократная		
* Образец № 1 - провод для катушки - вставки ИТЭР, ** Образец № 2 - перетянутый провод для катушки - вставки ИТЭР, *** Образец № 3 - из композита для катушки - вставки ИТЭР с наложением меди.			

Гистерезисные потери и эффективный диаметр волокна

Образец	Шаг скрутки, мм	s, мкм	D _{волн} , мкм	Q _h , кДж/м ³				D _{eff} , мкм			D _{eff} /D _{волн} (3 Тл)
				0,5 Тл	1 Тл	2 Тл	3 Тл	1 Тл	2 Тл	3 Тл	
№1	6,5	1,50	9,8	32,5	54	88	106	-	-	12	1,22
№2	2,2	1,03	6,7	28,5	38	57	72	9,4	7,8	7,8	1,16
№2	3,6	1,03	6,7	30	42	59,5	74	9,6	8,1	8,1	1,21
№2	4,0	1,03	6,7	29,5	40,5	58,5	74	9,6	8,1	8	1,19
№3	4,0	0,80	5,2	36,5	54	69	86	15,7	12,5	12	2,31

Фрагменты поперечного сечения

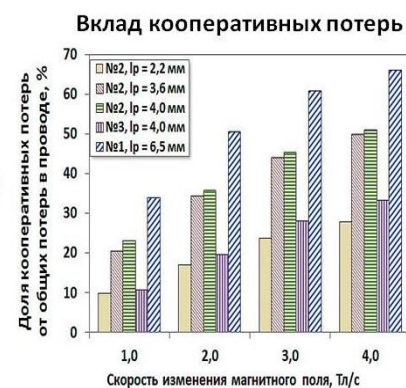
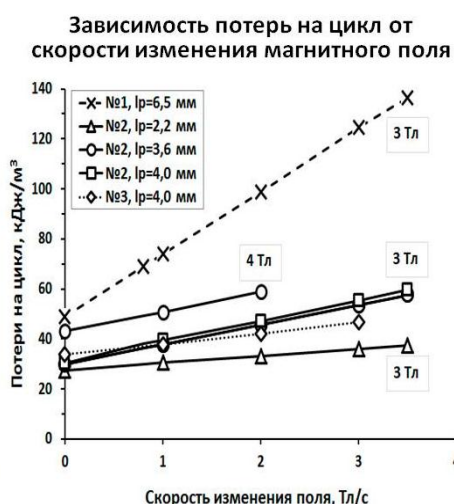
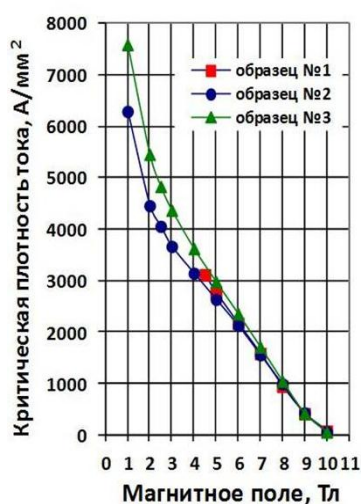
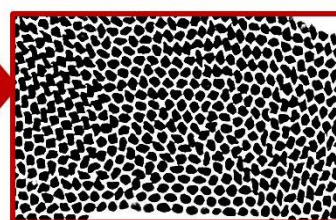
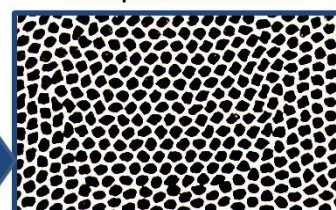
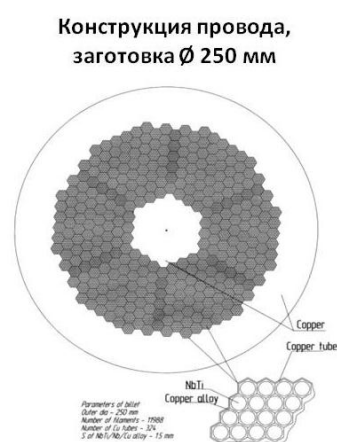


Рис. 7. Влияние параметров провода на токовые характеристики и энергетические потери в модельных образцах NbTi проводов в медной матрице.

На рис. 7 представлена диаграмма, характеризующая вклад кооперативных потерь в общие потери, которая построена на основании зависимости потерь на цикл от скорости изменения поля. Из нее следует, что основной вклад в энергетические потери при скорости изменения поля 1 Тл/с (соответствующей условиям работы синхротрона SIS 300) вносят гистерезисные потери ~ 70 %, а при скорости изменения поля 4 Тл/с (соответствующей условиям работы синхротрона SIS 100) – гистерезисные и кооперативные потери составляют равные доли.

Руководствуясь результатами исследования модельных образцов NbTi проводов в медной матрице разработчики магнитной системы ускорителя ФАИР уточнили предварительные требования к проводу (рис. 8.), в которых значение относительного остаточного сопротивления (RRR) на уровне 38 единиц подразумевает использование резистивной матрицы в волоконной зоне.

Уточненные предварительные требования к проводу Ø 0,65 мм для модельного магнита ускорителя ФАИР		Параметры провода заготовка Ø 250 мм	Харак - ки провода заготовка Ø 130 мм
Диаметр провода, мм	0,65	0,65	0,65
Количество волокон, шт	-	324 × 37 11988	78 × 127 10644
Отношение Cu/не Cu (K3)	1,8 (0,36)	1,8	1,8
Диаметр волокна, мкм	2,5 - 3,5	3,46	3,5
Шаг скрутки *, мм	min	-	8
Критическая плотность тока в поле 5 Тл при температуре 4,2 К, А/мм ²	2700	-	2700
RRR готового провода	> 38	-	> 150
Материал межволоконной матрицы	-	MH 95-5	MH 95-5
Меж волоконное расстояние	-	0,496	0,496
Энергетические потери (± 3,0 Тл), мДж/см ³	min	-	50
*- минимальный шаг скрутки, не приводящий к деградации критического тока			



Модельный провод,
заготовка Ø 130 мм

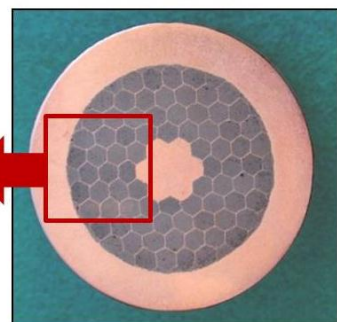
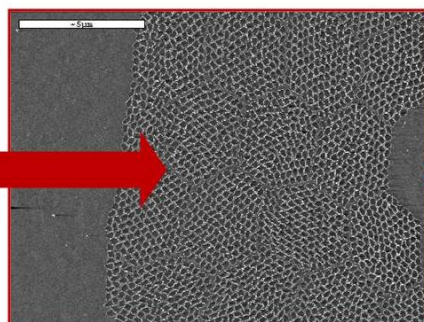
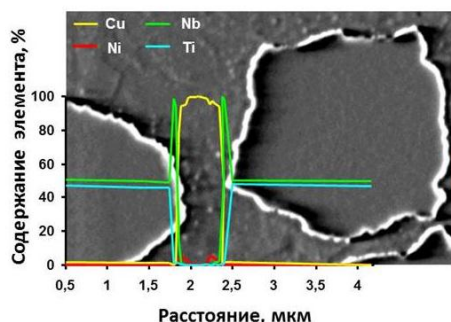


Рис. 8. Результаты разработки и исследований NbTi провода диаметром 0,65 мм однократной сборки в комбинированной Cu/Cu-Ni матрице.

В соответствии с уточненными требованиями было проведено направленное конструирование провода и разработаны конструкции промышленной и модельной составных заготовок сотового типа для изготовления по методу однократной сборки NbTi провода в комбинированной Cu/Cu-Ni матрице с использованием в волоконной зоне резистивного сплава MH 95-5 (рис. 8.), а также разработана технология его

изготовления, включающая шесть промежуточных отжигов при температуре 375 °С в течение 24 часов, заключительную деформацию волочением с вытяжкой 59, скрутку с последующей калибровкой, обеспечивающие на конечном диаметре шаг 8 мм, и заключительный отжиг при температуре 250 °С в течение 1 часа.

Реализуемость технологии подтверждена на примере впервые изготовленного модельного провода, который имеет критическую плотность тока 2700 А/мм² (5 Тл; 4,2 К), гистерезисные потери ≤ 50 кДж/м³ ($\pm 3,0$ Тл) и $RRR \geq 190$.

Использование в волоконной зоне резистивного сплава МН 95-5 в условиях разработанных режимов изготовления предотвращает образование электромагнитной связи волокон при расчетном диаметре волокон ~ 3 -3,5 мкм и межволоконном расстоянии 0,5-0,7 мкм для провода диаметром $\sim 0,65$ -0,8 мм.

Несмотря на то, что изготовленный модельный провод соответствовал уточненным предварительным требованиям ФАИР и может быть использован для работы в условиях изменяющегося магнитного поля со скоростью до 4 Тл/с, требования к сверхпроводящим проводам вновь были пересмотрены. В частности, для обеспечения требования по повышению температурного запаса быстроциклирующих магнитов SIS 100 и SIS 300 разработчики магнитов решили увеличить токонесущую способность сверхпроводящих обмоток за счет увеличения диаметра проводов соответственно с 0,65 мм до 0,8 мм и 0,825 мм, сохранив требования к диаметру волокон на уровне $\sim 2,5$ -3,5 мкм. При этом в качестве межволоконной матрицы было рекомендовано использовать медно-марганцевый сплав Cu-0,5 Mn, применение которого обусловлено его эффективностью по предотвращению электромагнитной связи волокон, а также близкими к меди механическими свойствами.

Увеличение диаметра проводов на 0,15 мм и 0,175 мм при сохранении малого диаметра волокон $\sim 2,5$ -3,5 мкм приводит к резкому усложнению сборки составных многоволоконных заготовок, используемых для получения проводов. В этом случае при применении метода однократной сборки потребуются собрать заготовку из ~ 40000 элементов с размером «под ключ» 1,16 мм и менее. Мировая промышленность пока не готова к изготовлению проводов методом однократной сборки из заготовок, собираемых с такими размерами шестигранных элементов и таким числом элементов. Поэтому потребовались экспериментальные работы по получению проводов такого класса более удобным для промышленности способом – методом двукратной сборки.

Возможность получения сверхпроводящих NbTi проводов нового класса диаметром $\sim 0,8$ мм с диаметром волокна $\sim 2,5$ -3,5 мкм, содержащих сплав Cu-0,5 Mn между волокнами, была продемонстрирована путем разработки и изготовления двух вариантов экспериментальных NbTi проводов в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице по методу двукратной сборки (рис. 9).

Вариант 1 представляет собой классическую двукратную сборку, когда в первой и второй многоволоконных заготовках располагается умеренное число прутков (до 500 шт.).

В Варианте 2 число прутков в первой многоволоконной заготовке на порядок больше, а во второй – на порядок меньше, чем в Варианте 1. Вариант 2 по конструкции максимально приближен к проводам однократной сборки, поскольку в нем доля искаженных по форме волокон, находящихся на границе с матрицей, существенно ниже, и, следовательно, ниже уровень ожидаемых гистерезисных потерь.


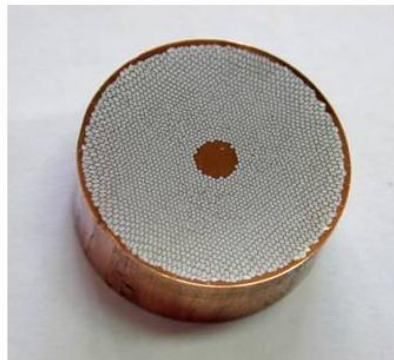
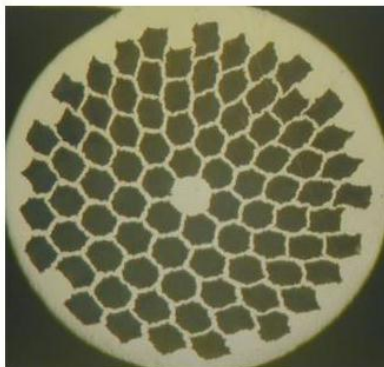
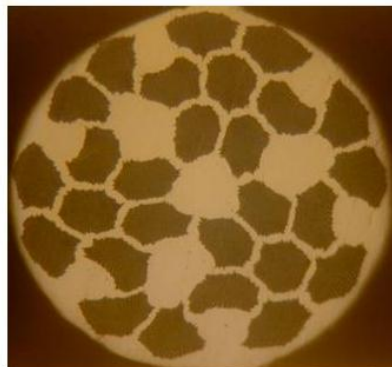
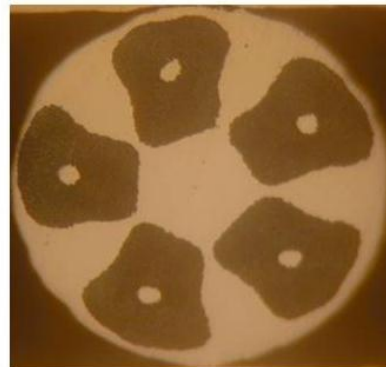
Вариант 1		Вариант 2	
Сечения выдавленных многоволоконных прутков первой составной заготовки			
			
Сечения экспериментальных проводов			
			
Конструкция 379 × 84 Диаметр провода 0,825 мм Диаметр волокна 2,9 мкм * Шаг скрутки 11 мм	Конструкция 379 × 27 Диаметр провода 0,50 мм Диаметр волокна 3,1 мкм * Шаг скрутки 8 мм	Конструкция 3125 × 5 Диаметр провода 0,79 мм Диаметр волокна 4,1 мкм * Шаг скрутки 8 мм	
Основные результаты			
Р гистерезисные ± 3 Тл 50,6 мДж/см ³ Jс (5 Тл; 4,2 К) = 2550 А/мм ²	Р гистерезисные ± 3 Тл 29 мДж/см ³ Jс (5 Тл; 4,2 К) = 2630 А/мм ²	Р гистерезисные ± 3 Тл 44 мДж/см ³ Jс (5 Тл; 4,2 К) = 2400 А/мм ²	
* Расчётный диаметр волокна			

Рис.9. Экспериментальные NbTi провода двукратной сборки в Cu/Cu-Mn матрице для работы в условиях изменяющегося магнитного поля со скоростью до 4 Тл/с.

При расчетном диаметре волокон ~ 2,5-3,5 мкм и межволоконном расстоянии 0,5-0,7 мкм для провода диаметром ~ 0,8 мм, межволоконная матрица из сплава Cu-0,5 Mn предотвращает образование электромагнитной связи волокон, а матрица из

чистой меди на периферии и в центре сечения провода обеспечивает требование по его стабилизации (относительному остаточному электросопротивлению – RRR).

Разработанные режимы изготовления, включающие 4 и 5 промежуточных отжига при температуре 375 °С общей длительностью соответственно 96 и 120 часов, скрутку с последующей калибровкой, обеспечивающие на конечном диаметре шаг 8 мм, и заключительный отжиг при температуре 250 °С в течение 1 часа обеспечивают в проводах с отношением Cu/non Cu – 1,38-1,44 следующие свойства: критическую плотность тока 2500-2600 А/мм² (5 Тл; 4,2 К), гистерезисные потери < 50 кДж/м³ (± 3 Тл) и RRR ≥ 100.

По результатам исследований экспериментальных NbTi проводов двукратной сборки в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице совместно с разработчиками магнитов для синхротронов SIS 100 (типа «нуклотрон») и SIS 300 (типа «cos θ») были сформулированы новые требования соответственно к проводам диаметрами 0,8 мм и 0,825 мм (рис.10), в соответствии с которыми разработаны два варианта конструкций и промышленная технология изготовления по методу двукратной сборки NbTi проводов диаметрами 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-0,5 Mn матрице с диаметром волокна ≤ 3,5 мкм.

Параметр провода	Прототип квадрупольного магнита синхротрона SIS 300 (ИФВЭ, Протвино)		Прототип однослойного изогнутого дипольного магнита синхротрона SIS 100 (GSI, Германия)		
	Требование	Результат	Требование	Вариант 1	Вариант 2
Вариант конструкции	-	Вариант 1	-	Вариант 1	Вариант 2
Тип сборки	Двукратная	Двукратная 439 × 78	Двукратная	Двукратная 379 × 114	Двукратная 1735 × 17
Диаметр провода, мм	0,825 ^{+0,005}	0,828	0,8 ^{+0,005}	0,802	0,803
Диаметр волокна, мкм	< 3,5	2,91	2,4 ÷ 3,4	2,5	3,0
Шаг скрутки, мм	< 12	8	≤ 8	7	7
Количество волокон, шт.	-	34242	-	43206	29495
Направление скрутки	Правая	Правая	Правая	Правая	Правая
Материал матрицы между волокнами	Cu-Mn	Cu-0,5 мас. % Mn	Cu-Mn	Cu-0,5 мас. % Mn	Cu-0,5 мас. % Mn
Материал матрицы на оболочке и в центре	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu
Отношение Cu/nonCu	1,38 ^{+0,1}	1,31 - 1,37	1,4 ^{+0,1}	1,42 - 1,44	1,50 - 1,57
Критический ток, А (5 Тл; 4,2 К; 0,1 мкВ/см)	> 500	529 - 591	-	503 - 511	497 - 512
Критический ток, А (2 Тл; 4,2 К; 0,1 мкВ/см)	-	-	> 913	960 - 970	946 - 976
Параметр нарастания напряжения (5 Тл; 4,2 К)	n ≥ 30	43 - 54	-	40 - 43	45 - 55
Гистерезисные потери (± 3,0 Тл), мДж / см ³	-	49 - 54	-	35 - 40	32 - 34
Эффективный диаметр волокна (± 3,0 Тл), мкм	-	4,7 - 5,4	-	3,5 - 4,2	3,7 - 3,8
Отношение D _{эф} /D _{расчет}	-	1,61 - 1,85	-	1,40 - 1,68	1,23 - 1,27
Отношение RRR	≥ 100	130 - 143	≥ 75	97 - 116	141 - 160
Длина единичного куска, м	> 500	540-700	> 260	800 - 1000	800 - 1000

Требования к NbTi проводу для модельного быстроциклирующего магнита SPS, ЦЕРН		
Характеристика провода		Значение
Диаметр, мм		0,70÷0,90
Диаметр волокна, мкм		~ 3,5÷5,0
Отношение медь/ не медь		1,35 ± 0,1
Межволоконная матрица		медно-резистивная
Шаг скрутки, мм		6÷10
Гистерезисные потери, мДж/см ³		≤ 50
J _c , А/мм ²	(7 Тл; T=1,9 К)	> 1500
	(5 Тл; T=4,2 К)	-
RRR		> 100

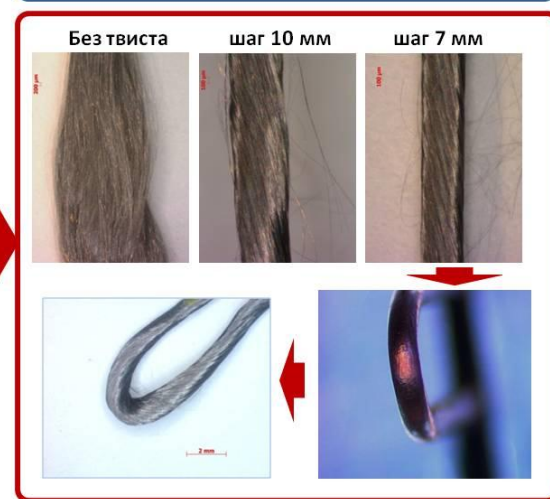


Рис. 10. Требования и характеристики, изготовленных NbTi проводов диаметром 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-0,5 Mn матрице

Для сокращения стоимости разработки оптимизированных конструкций двукратной сборки 439×78 и 379×114 Вариант 1 из заготовок диаметром 110 мм и 130 мм применительно к серийному производству, был заложен принцип использования имеющихся в наличии инструмента и оборудования.

При разработке усовершенствованной конструкции двукратной сборки 1735×17 Вариант 2 из заготовок диаметром 250 мм и 200 мм применительно к массовому производству в условиях АО ЧМЗ, был заложен принцип использования полуфабрикатов, применяемых при изготовлении проводов по проекту ИТЭР, в том числе и прутков сплава НТ-47, получаемых из слитков увеличенного размера – диаметром 320 мм. Такой подход существенно унифицирует процесс изготовления NbTi проводов и позволяет максимально использовать возможности существующего производства.

По разработанной технологии в опытно-промышленных и промышленных условиях выпущены представительные партии NbTi проводов в комбинированной Cu/Cu-0,5 Mn матрице с высокими токовыми характеристиками и низкими потерями для работы в условиях изменяющегося магнитного поля со скоростью до 4 Тл/с.

Изготовленные провода соответствуют новым требованиям (рис.10), предъявляемым к проводам для быстроциклирующих магнитов синхротронов SIS 100 и SIS 300, и требованиям, предъявляемым к проводу для высокопольного быстроциклирующего модельного магнита для модернизации суперпротонного синхротрона (Super Proton Synchrotron – SPS) в ЦЕРНе (Швейцария).

О высоком качестве свидетельствуют значения параметра «n», величина которого находится в интервале 40-55 единиц. Такие значения соответствуют композиционным проводам с неповрежденными волокнами. Целостность волокон сохраняется даже при твистировании провода с шагом скрутки 7 мм. Более того, целостность волокон не нарушается при испытании провода на острый изгиб на пластину толщиной 1,5 мм.

Общий вид и фрагменты поперечных сечений изготовленных проводов двукратной сборки в комбинированной Cu/Cu-Mn матрице для магнитов синхротронов SIS 300 и SIS 100 и величина их гистерезисных потерь в сравнении с другими проводами для ускорительной техники приведены на рис. 11.

Гистерезисные потери во всех изготовленных проводах для магнитов синхротронов SIS 300 и SIS 100 находятся на приемлемо низком уровне. Они в два раза ниже, чем в проводе двукратной сборки в медной матрице с диаметром волокна 6 мкм для УНК (Ускорительно - Накопительного Комплекса), из которого изготавливали первые прототипы магнитов для SIS 300, и существенно ниже, чем в современных проводах однократной сборки в медной матрице с диаметром волокна 6-7 мкм для ускорительного комплекса НИКА (Nuclotron-based Ion Collider fAcility).

При этом гистерезисные потери в проводах диаметром 0,8 мм для SIS 100, изготовленных по Варианту 1 и Варианту 2 отличаются. Минимальные потери ~ 60 мДж/см³ в пересчете на NbTi имеет провод, изготовленный по Варианту 2. Темным треугольником на рис. 11 показана расчётная величина гистерезисных потерь

в проводе для SIS 300 диаметром 0,825 мм при его изготовлении по Варианту 2. Разница в диаметрах (0,8 мм и 0,825 мм) приводит к незначительному увеличению расчетного диаметра волокна (с 3 до 3,1 мкм) в проводе Варианта 2 для SIS 300, а также незначительному увеличению гистерезисных потерь. При этом потери на $\sim 20 \text{ мДж/см}^3$ ниже, чем в проводе диаметром 0,825 мм с расчетным диаметром волокна 2,846 мкм, изготовленном по Варианту 1. Следовательно, провод для SIS 300 диаметром 0,825 мм при массовом выпуске целесообразно изготавливать по Варианту 2.

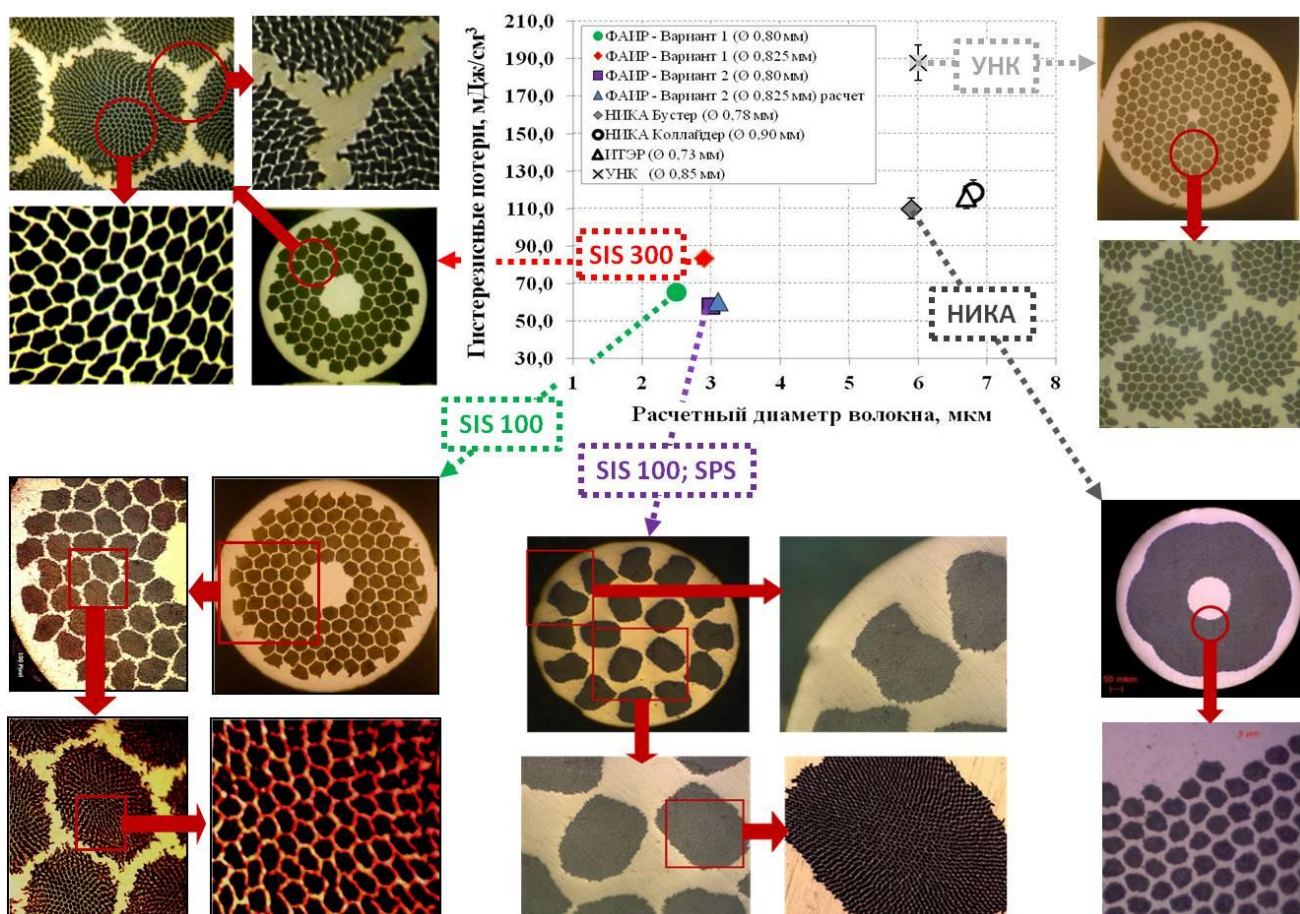


Рис.11. Гистерезисные потери на NbTi в композиционных NbTi проводах для быстроциклирующих магнитов ускорительной техники.

На основе нового класса NbTi проводов в комбинированной Cu/Cu-0,5 Мп матрице изготовлены и успешно испытаны прототип быстроциклирующего квадрупольного магнита типа « $\cos \theta$ » для синхротрона SIS 300 и прототип быстроциклирующего однослойного изогнутого дипольного магнита типа «нуклотрон» для синхротрона SIS 100, и в ближайшее время будет изготовлен и испытан быстроциклирующий модельный магнит типа « $\cos \theta$ » для SPS.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

В диссертации представлены результаты разработок и исследований, направленных на совершенствование технологического процесса изготовления

сверхпроводящих проводов на основе NbTi сплава, а также результаты, полученные при разработке технологии изготовления и исследовании NbTi проводов нового класса, предназначенных для работы в быстроциклирующих магнитах синхротронов SIS 300 и SIS 100 ускорительного комплекса ФАИР:

1. Исследована интенсивная пластическая деформация заготовок из сверхпроводящего сплава НТ-47 размером $\varnothing 32 \times 60$ мм, проведенная методом РКУП. Показано, что при комнатной температуре заготовка из сплава НТ-47 выдерживает до восьми последовательных ходов РКУП без изменения её геометрических параметров, что соответствует теоретической истинной степени деформации $e = 9,20$. Размер зерна во всем сечении заготовки после истинной деформации 6,90 и рекристаллизационного отжига при температуре 600 °С составляет ≤ 1 мкм.

2. Проведены исследования по получению однородной мелкозеренной структуры в прутках-сердечниках, изготовленных в промышленных условиях из слитков сплава НТ-47 разного размера и формы. Показано, что:

- интенсификация деформации за счет введения операции осадки слитка на сферическую шайбу перед гомогенизирующим отжигом при изготовлении прутков диаметром 89 мм из конического слитка размером $\varnothing 150 \times \varnothing 178 \times 450$ мм обеспечивает в процессе прессования более глубокую проработку материала, что приводит после рекристаллизационного отжига к формированию более однородной структуры со средним размером зерна 40 мкм на $\frac{1}{2}$ радиуса прутка.

- интенсификация деформации за счет увеличения диаметра цилиндрических слитков сплава НТ-47 до 320 мм и переработки их в прутки диаметром 108 и 89 мм с применением операций ковки и прессования, после отжига – рекристаллизации обеспечивает в прутках более однородную структуру со средним размером зерна 64 мкм и 50 мкм соответственно. Прутки, получаемые в условиях АО ЧМЗ из слитков диаметром 320 мм по новым технологическим схемам, превосходят по структурному состоянию прутки диаметром 89 мм, изготавливаемые по штатной технологии.

3. Проведены исследования, направленные на совершенствование структуры диффузионного барьера из ниобия за счет интенсификации деформации при его получении. Предложен новый тип барьера - многослойный барьер из тонколистового ниобия толщиной 0,26 мм. Разработана технологическая схема и режимы получения тонкостенного многослойного барьера, обеспечивающие после рекристаллизационного отжига при температуре 1050 °С в течение 1 часа оптимальное сочетание механических и структурных характеристик: средний размер зерна 28 мкм, однородная микротвердость по сечению листа при нагрузке 100 г на уровне 98 единиц, $\sigma_T = 231,3$ МПа, $\sigma_B = 284,2$ МПа и $\delta = 36$ %, что превосходит характеристики применяемых барьеров из ниобия в виде обечайки и трубы.

4. Исследовано влияние диаметра волокон и межволоконного расстояния на электрофизические характеристики модельных образцов NbTi проводов в медной матрице. Показано, что в проводах с диаметром волокон менее 3,5 мкм для ускорителя ФАИР во избежание электромагнитного взаимодействия, приводящего к росту энергетических потерь, в волоконной зоне вместо медной матрицы следует

использовать сплавы меди с никелем или марганцем, которые при близких механических свойствах имеют более высокое электрическое сопротивление, чем медь.

5. Исследованы свойства резистивного медно-марганцевого сплава Cu-0,5 Mn. Показано, что полученный сплав по структурному состоянию, механическим и физическим свойствам удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалу для межволоконной матрицы в композитном сверхпроводящем проводе для быстроциклирующих магнитов.

6. Разработана конструкция NbTi провода диаметром 0,65 мм в комбинированной Cu/Cu-Ni матрице и технология его получения из заготовки промышленного масштаба по методу однократной сборки с использованием в волоконной зоне резистивного сплава МН 95-5. Изготовлен модельный провод диаметром 0,65 мм для работы в условиях изменяющегося поля со скоростью до 4 Тл/с, имеющий отношение Cu/non Cu – 1,8, критическую плотность тока 2700 А/мм^2 (5 Тл; 4,2 К), гистерезисные потери $\leq 50 \text{ кДж/м}^3$ ($\pm 3,0 \text{ Тл}$) и $\text{RRR} \geq 190$, что соответствует предварительным требованиям ФАИР.

7. В обеспечение требования по повышению температурного запаса сверхпроводящих обмоток быстроциклирующих магнитов ускорителя ФАИР рассчитаны конструкции и изготовлены по методу двукратной сборки экспериментальные NbTi провода увеличенного диаметра – 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-0,5 Mn матрице, при сохранении диаметра волокна $< 3,5 \text{ мкм}$. Получены данные по критической плотности тока, механическим характеристикам, энергетическим потерям и технологичности проводов, на основании которых сформулированы новые требования к проводам для быстроциклирующих магнитов синхротронов SIS 100 и SIS 300.

8. Разработаны два варианта конструкций и промышленная технология изготовления по методу двукратной сборки NbTi проводов диаметрами 0,8 мм и 0,825 мм в комбинированной Cu/Cu-0,5 Mn матрице с диаметром волокна $< 3,5 \text{ мкм}$, отвечающие новым требованиям по токонесущей способности и уровню энергетических потерь.

9. Впервые в опытно-промышленных и промышленных условиях выпущены партии NbTi проводов в комбинированной Cu/Cu-0,5 Mn матрице, соответствующие требованиям, предъявляемым к NbTi проводам для быстроциклирующих магнитов, работающих в условиях изменяющегося магнитного поля со скоростью до 4 Тл/с.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Издания, рекомендованные ВАК:

1. «Разработка сверхпроводящих проводов NbTi/Cu-Mn/Cu для магнитной системы синхротрона SIS300 ускорителя FAIR», Карасев Ю.В., Потанина Л.В., Панцырный В.И., Салунин Н.И., Губкин И.Н., Корпусов В.Ю., Вопросы атомной науки и техники, серия: Материаловедение и новые материалы, выпуск 2(73), 2012 г., с. 92-99.

2. «Композитные технические сверхпроводники» Абдюханов И.М., Потапенко М.М., Алексеев М.В., Цаплева А.С., Курилкин М.О., Зубок Е.А., Дергунова Е.А., Мареев К.А., Крылова М.В., Дробышев В.А., Карасев Ю.В., Губкин И.Н., Салунин Н.И., Корпусов В.Ю., Раков Д.Н., Белотелова Ю.Н., Борисов А.В., Котова Е.В., Кравцова М.В., Мальченков А.В., Атомная энергия, Т.119, Вып.5, ноябрь 2015.

3. Study of low loss experimental superconducting Nb-Ti wires to be used in FAIR magnets Karasev Y.V., Salunin N.I., Pantsyrny V.I., Gubkin I.N., Malchenkov A.V., Polikarpova M.V., Abdyukhanov I.M., Potanina L.V., Voloshin I.F., Kalinov A.V.; IEEE Transactions on Applied Superconductivity, JUNE 2015, VOL. 25, NO. 3, 6001405.

4. Исследование структуры и микротвердости цилиндрических заготовок из Nb-Ti сплава, обработанных методом равноканального углового прессования (РКУП) Карасёв Ю.В., Губкин И.Н., Мальченков А.В., Никуленков Е.В., Шевякова С.А., Потапенко М.М.; Вопросы атомной науки и техники, Серия Материаловедение и новые материалы, 2018, выпуск 2(93) с. 62-72.

5. Исследование структуры механических и электрофизических свойств сплава Cu-0,5Mn; Карасёв Ю.В., Мальченков А.В., Губкин И.Н., Дробышев В.А., Шевякова С.А., Кравцова М.В., Поликарпова М.В.; Вопросы атомной науки и техники, Серия Материаловедение и новые материалы, 2019, выпуск 1(97) с. 24-33.

6. Сверхпроводящие провода для быстроциклирующих магнитов ускорительного комплекса FAIR, Губкин И.Н., Зубко В.В., Карасёв Ю.В., Корпусов В.Ю., Потанина Л.В., Салунин Н.И., Кабели и провода, № 4(384) 2020 г, с. 3-13.

Патент

1. Патент РФ на полезную модель № 149395 «Сверхпроводящий провод с низкими энергетическими потерями», Салунин Н.И., Карасев Ю.В., Губкин И.Н., Воробьева А.Е., Панцырный В.И.; заявитель и патентообладатель открытое акционерное общество «ТВЭЛ» (АО «ТВЭЛ») – № 2014124003/07; заявл. 11.06.2014; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36. – 7 с.

Материалы конференций:

1. Разработка технических сверхпроводников и их компонентов Воробьева А.Е., Шиков А.К., Абдюханов И.М., Карасев Ю.В., Дробышев В.А., Потапенко М.М., Раков Д.Н., Панцырный В.И., Дергунова Е.А., Мареев К.А., Губкин И.Н., Потанина Л.В., сборник трудов II-й национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2013, НИЦ «Курчатовский институт», 2014 г., с. 54-61.

2. Состояние разработок технических сверхпроводников АО «ВНИИНМ» Абдюханов И.М., Потапенко М.М., Алексеев М.В., Карасев Ю.В., Дробышев В.А., Цаплева А.С., Раков Д.Н., сборник трудов III-й национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015, НИЦ «Курчатовский институт», 2017 г., с. 59-73.