

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель директора по научной работе
НИИ «Курчатовский институт»

Р.А. Санду

2018г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Алиева Руслана Теймуровича

«Структура и свойства композиционных Nb₃Sn сверхпроводников и совершенствование технологии их изготовления»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

По совокупности электродинамических характеристик Nb_3Sn сверхпроводники являются одними из самых востребованных технических сверхпроводников, применяемых для изготовления магнитных систем промышленной физики, таких как высокопольные магниты, ускорители частиц, ТОКАМАКи и др. Одним из последних крупномасштабных проектов, потребовавших больших объёмов Nb_3Sn (НО) сверхпроводников, стало создание международного термоядерного реактора ИТЭР, в котором Россия играет одну из ключевых ролей. В частности, Российская Федерация должна была поставить до 80 тонн НО сверхпроводящего провода для тороидальных катушек магнитной системы реактора.

Nb₃Sn сверхпроводники представляют из себя композиционные провода со сложной структурой, а технология их производства достаточно сложная, длительная и включает в себя множество высокотехнологических операций, которые посильны лишь узкому кругу высокоразвитых стран.

Автор поставил **целью своей диссертационной работы** оптимизацию технологии Nb_3Sn сверхпроводников с повышенными сверхпроводящими и эксплуатационными свойствами и снижение затрат за счет сокращения длительности технологического передела.

Актуальность выбранной темы обусловлена не только необходимостью выпуска большого объема Nb_3Sn сверхпроводников для проекта ИТЭР с весьма высокими требованиями по свойствам, но и применением результатов работы при разработке технологии Nb_3Sn сверхпроводников с высокими электрофизическими характеристиками для последующих крупномасштабных проектов, таких как ДЕМО-ТИН, модернизация БАК и др.

Диссертационная работа изложена на 170 страницах печатного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 76 наименований, содержит 118 рисунков и 19 таблиц.

Во введении автор обосновывает актуальность выбранной темы, ставит цели и задачи исследований, определяет научную новизну и практическую значимость.

В первой главе приводится обзор литературы по Nb_3Sn сверхпроводникам, особенностями их конструкции, структуре сверхпроводящей фазы и свойствам основных применяемых материалов – ниобия, высокооловянной бронзы, тантала и меди. На основе проведенного тщательного анализа источников автору удалось выделить основные факторы, влияющие на электрофизические характеристики, такие как легирование титаном, структура и морфология сверхпроводящего слоя, содержание олова в бронзовой матрице. Приведен анализ свойств основных образующих композиционный проводник материалов. Показано, что на момент начала работы не было удовлетворяющих данных по изменению механических свойств высокооловянной бронзы с содержанием олова 14,0-14,5% мас. и титана 0,2-0,25 % мас., и высокочистого ниобия марки НБМ в составе композита при его деформировании и термообработках.

Представляется, что в обзоре литературы не уделено достаточного внимания более полному описанию механических свойств композиционных проводов в целом.

Вторая глава посвящена рассмотрению способов получения исходных материалов для исследований. Подробно описаны технологические опытные партии Nb_3Sn стренда с различным типом легирования титаном и содержанием олова в матрице. Приводятся описание использованных методик изучения механических свойств, а также методов проведения структурных исследований, таких как оптическая и электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ. Описаны методики измерения электрофизических свойств образцов сверхпроводящего провода.

Результаты исследования изменения механических свойств легированной титаном (0,2% мас.) высокооловянной бронзы с содержанием 14,5% мас. олова и высокочистого ниобия (марки НБМ) при растяжении, сжатии и во время совместного деформирования внутри композита приводятся в **третьей главе** диссертации. Автор установил, что для полного разупрочнения высокооловянной легированной титаном бронзы достаточно отжига при температуре 500 °С с выдержкой порядка 10 мин. Было показано, что при совместном деформировании внутри композиционного провода высокооловянная легированная титаном матрица интенсивно нагартовывается при небольших степенях обжатия порядка 30% и полностью восстанавливает свою твердость после промежуточных термообработок. В отличие от матрицы ниобиевые волокна постепенно повышают свою твердость, на величину которой промежуточные термообработки не оказывают влияние вследствие недостаточной температуры. Полученные данные и проведенный анализ позволил автору разработать оптимизированный маршрут волочения композиционного провода.

Четвертая глава посвящена разработке оптимизированного маршрута волочения опытных партий НО сверхпроводников, изучению влияния легирования титаном и содержания олова в матрице на их сверхпроводящие

характеристики. На основе проведенных исследований механических свойств, структуры и электрофизических характеристик, автором установлено что применение легированной титаном бронзовой матрицы позволяет повысить критическую плотность тока полученных сверхпроводников с $\sim 870 \text{ А/мм}^2$ до $\sim 940 \text{ А/мм}^2$, а применение оптимизированного маршрута значительно снижает время их изготовления на 20-25%.

В пятой главе приводятся результаты внедрения разработанного диссертантом оптимизированного маршрута волочения в технологический процесс промышленного выпуска Nb_3Sn сверхпроводников для проекта ИТЭР на Чепецком металлургическом заводе (АО ЧМЗ). Автор показал, что оптимизация маршрута волочения позволила на 30% снизить общее время проведения промежуточных термообработок и получить сверхпроводящие провода с критическим током в среднем равным 210-215 А, что превышает минимальные требования в 190 А (в поле 12 Тл и температуре 4,2 К).

В заключении автор обобщает основные полученные результаты и выводы на их основе.

К основным **научно значимым достижением** работы относятся:

- Полученные новые достоверные данные по изменению механических свойств при различных температурах и скоростях деформации высокооловянной бронзы (с содержанием олова до 14,5 % мас. и титана 0,2 %мас.) и высокочистого ниобия (марки НБМ).

- Новые данные о влиянии деформации и разупрочняющих отжигов на механические свойства композиционных проводов в процессе их технологического передела (волочения).

- Результаты исследований влияния способа легирования и содержания олова в бронзовой матрице на морфологию зеренной структуры сверхпроводящего слоя и токонесущую способность Nb_3Sn сверхпроводников.

- Особый интерес вызывает получение Nb_3Sn сверхпроводника с 15,5 % мас. содержания олова в матрице и наиболее высокой плотностью критического тока до 978 А/мм^2 (в поле 12 Тл и температуре 4,2 К).

Практическая значимость работы надежно подтверждена успешным внедрением полученных результатов в промышленное производство Nb_3Sn сверхпроводников на АО ЧМЗ (г. Глазов), где в течение 5 лет данные сверхпроводники выпускались для проекта ИТЭР. Результаты исследований позволили оптимизировать технологический процесс, снизить технологические потери материала и сократить время изготовления сверхпроводников. Также большой практический интерес вызывают полученные данные по разупрочнению высокооловянной бронзы и высокочистого ниобия в зависимости от режимов термообработки, которые будут востребованы при разработке технологии производства Nb_3Sn сверхпроводников для будущих проектов.

Достоверность полученных результатов и сделанных на их основании выводов основана на применении таких взаимодополняющих современных методов аналитических исследований как оптическая и электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ, рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ. Достоверность также подтверждена публикациями и выступлениями на конференциях, а главное, успешным внедрением результатов работы на промышленном предприятии (АО ЧМЗ).

Полученные в работе результаты могут быть рекомендованы для использования в научных организациях, занимающихся разработкой и исследованием низкотемпературных сверхпроводников, таких как АО «ВНИИНМ», НИЦ «Курчатовский институт», АО «ВНИИКП» и др., а также на АО «ЧМЗ», где налажен выпуск низкотемпературных сверхпроводников. АО «ВНИИНМ» рекомендуется продолжить исследования по повышению свойств и оптимизации технологии Nb_3Sn сверхпроводников.

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Поскольку количество волокон в экспериментальных опытных партиях и промышленно выпускаемых стрендах для ИТЭР несколько разнятся, то следовало бы более полно обосновать применимость разработанного оптимизированного технологического маршрута для выпуска последних.

2. Изменение структуры оловянной бронзы после проведения разупрочняющих отжигов следовало рассмотреть более подробно.

3. Целесообразно было исследовать структуру сверхпроводящего слоя при различных режимах заключительного диффузионного отжига.

4. К сожалению, в итогах работы не приводятся данные о сохранении выхода годного продукта при переходе на бронзу с 15,5 % олова.

Сделанные замечания не ставят под сомнение достоверность полученных результатов и сделанных на их основании выводов и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Автореферат полностью соответствует диссертации, а результаты в полной мере освещены в публикациях, в том числе входящих в Перечень ВАК, доложены на представительных международных конференциях, и хорошо известны специалистам.

Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для российской науки и практики в области низкотемпературных технических сверхпроводников. Выводы и рекомендации полностью обоснованы.


По своей актуальности, новизне, достоверности, научной и практической значимости диссертация Алиева Р.Т. «Структура и свойства композиционных Nb_3Sn сверхпроводников и совершенствование технологии их изготовления» полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842,

соответствует специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» по техническим наукам, а ее автор в полной мере заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».


Диссертационная работа Алиева Р.Т. «Структура и свойства композиционных Nb_3Sn сверхпроводников и совершенствование технологии их изготовления» была заслушана, а отзыв обсужден и одобрен на заседании отделения сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС - природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт» 24 мая 2018 г. (протокол № 2/18).

Отзыв подготовил:

Руководитель отделения сверхпроводимости
Курчатовского комплекса НБИКС -
природоподобных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»,
кандидат технических наук

 В.С. Круглов

И.о. ученого секретаря отделения
сверхпроводимости
Курчатовского комплекса НБИКС -
природоподобных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»

 В.В. Гурьев

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

 С.Ю. Стремоухов

Адрес:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Телефон: +7 (499) 196-95-39; e-mail: nrcki@nrcki.ru