

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ

ИНСТИТУТ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.А. БОЧВАРА» (АО «ВНИИНМ»)

**КОНОВАЛОВА НАДЕЖДА ВИКТОРОВНА**

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА Nb<sub>3</sub>Sn СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ  
РАБОТЫ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Специальность 2.6.1 –

«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

Кандидат технических наук

Абдюханов Ильдар Мансурович

МОСКВА 2026

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В поисках эффективных источников энергии ученые разрабатывают все более сложные установки, такие как международный термоядерный экспериментальный реактор – ИТЭР, демонстрационный термоядерный реактор – ДЕМО, а для изучения строения веществ на субатомном уровне создают крупномасштабные ускорители, например, Большой Адронный Коллайдер с высокой светимостью (High Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC)). В подобных установках используют сверхпроводящие магнитные системы для создания магнитных полей с высокой напряжённостью (выше 5 Тл), которые работают, как правило, при температуре около 4 К.

Одним из основных материалов для создания токонесущих элементов для крупных магнитных систем с высокими значениями напряженности магнитного поля в настоящее время являются  $Nb_3Sn$  сверхпроводники.

Среди наиболее промышленно освоенных методов получения  $Nb_3Sn$  сверхпроводников можно отметить так называемый бронзовый метод, в котором бронзовая матрица является источником олова для образования сверхпроводящего слоя  $Nb_3Sn$  в композите, содержащем ниобиевые волокна. Технология изготовления сверхпроводников по бронзовому методу заключается в деформировании до требуемого размера композиционной заготовки, состоящей из ниобиевых и бронзовых прутков, размещенных специальным образом в медной оболочке, отделенной диффузионным барьером. Готовые единичные сверхпроводники (далее – стренды, называемые так по международной терминологии) направляют для изготовления кабеля в оболочке, а затем и обмотки магнита, и только после изготовления обмоток подвергают реакционной термообработке (далее РТО) для формирования хрупкой сверхпроводящей фазы  $Nb_3Sn$ .

Большой вклад в развитие бронзовой технологии получения  $Nb_3Sn$  сверхпроводников в России внес проект Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР). Для этого проекта в России было изготовлено порядка 100 тонн  $Nb_3Sn$  стренда со стабильными характеристиками. Конструктивная плотность критического тока ( $J_c$ ) стрендов для ИТЭР диаметром менее миллиметра составила 700-800 А/мм<sup>2</sup> в магнитном поле 12 Тл при 4,2 К.

$Nb_3Sn$  сверхпроводники, изготовленные по бронзовой технологии, из-за большой длины единичных кусков, высокой стабильности и низких потерь, рассматриваются как перспективный материал и для следующего поколения ускорителей и термоядерных реакторов, работающих в более высоких полях. В этой связи исследования, направленные на повышение высокополевых электрофизических характеристик в стрендах, получаемых по бронзовой технологии, являются актуальной задачей.

Дальнейшее увеличение  $J_c$   $Nb_3Sn$  стрендов может быть достигнуто при использовании бронзы с повышенным (более 14 мас. % Sn) содержанием Sn. Однако повышение содержания Sn затрудняет ее деформирование в составе композита, что вызывает необходимость разработки способов изготовления высокооловянной бронзы, способной к пластической деформации, а также оптимизации технологических режимов изготовления композиционных полуфабрикатов на ее основе.

Другим способом увеличения токонесущей способности  $Nb_3Sn$  стрендов в сильных магнитных полях (более 12 Тл) является дополнительное легирование, например, Ti и/или Ta. Известно, что малые добавки обоих элементов сильно повышают верхнее критическое поле ( $B_{c2}$ ) и незначительно критическую температуру ( $T_c$ ). Однако в литературе недостаточно сведений о влиянии одновременного легирования Ti и Ta на электрофизические свойства стрендов и микроструктуру сверхпроводящего  $(Nb,Ti,Ta)_3Sn$  слоя.

**Целью работы является:** оптимизация технологических режимов получения полуфабрикатов и конструкции композиционных  $Nb_3Sn$  сверхпроводников на основе легированной высокооловянной бронзы (15,5-16 мас. % Sn) для высокопольных магнитов (более 12 Тл).

**Для достижения цели были решены следующие научные задачи:**

1. Изучить влияние методов получения легированной бронзы с содержанием 14 – 16 мас. % Sn (дуплекс-процессом, Osprey-технологией и полунепрерывным литьем) на ее микроструктуру и механические свойства в литом состоянии.
2. Изучить влияние деформации и термической обработки на механические свойства и микроструктуру композиционных прутков  $(CuSnTi/Nb)$  и полуфабрикатов из бронзы, легированной Ti и Zr с содержанием 14 – 16 мас. % Sn.
3. Разработать конструкции и технологические режимы получения многоволоконных  $Nb_3Sn$  сверхпроводников с бронзовой матрицей, содержащей 15,5 – 16 мас. % Sn, легированной Ti и Zr, и волокнами из Nb-Ta сплава. На основании этих разработок изготовить экспериментальные партии стрендов.
4. Исследовать влияние легирования и содержания Sn в бронзовой матрице на микроструктуру сверхпроводящего  $Nb_3Sn$  слоя и электрофизические свойства готовых сверхпроводников ( $I_c$ ,  $T_c$ ) в высоких магнитных полях.

**Научная новизна**

1. Впервые выявлено влияние легирования Ti и Zr на размер эвтектоидных включений в высокооловянной бронзе. Показано, что повышение содержания Ti от 0,10 до 0,25 мас. % приводит к уменьшению характерного размера эвтектоида на 44%, а дополнительное введение Zr способствует снижению их размера еще на 33%.

2. Выявлена взаимосвязь методов получения бронзы с повышенным содержанием Sn до 16 мас. %, (Osprey-технологии и полунепрерывного литья) и ее микроструктуры и механических свойств. Показано, что использование этих методов обеспечивает более равномерное, по сравнению с дуплекс - процессом, распределение эвтектоидных включений по сечению слитка (разброс размеров включений между центральной и периферийной областью слитка составляет менее 5 мкм).

3. Впервые выявлены особенности влияния пластической деформации и режимов термической обработки на механические свойства и микроструктуру легированной высокооловянной бронзы, полученной разными методами, что позволило оптимизировать режимы деформации и промежуточных отжигов бронзовых прутков.

4. Выявлено влияние увеличения содержания Sn с 14 до 16 мас. % в матрице многоволоконных стрендов (диаметром 1 мм, с более 19 тыс. волокон) на морфологию зеренной структуры  $Nb_3Sn$  сверхпроводящего слоя. Показано, что соотношение размеров областей, отличающихся формой зерна, изменяется: в  $Nb_3Sn$  слое увеличивается доля равноосных зерен (на ~12%), при одновременном сокращении долей столбчатых зерен и остаточного ниобия на ~12 %, что приводит к увеличению плотности межзеренных границ и, соответственно, к повышению токонесущей способности стренда. Достигнуто увеличение  $J_c$  на 15 % (12 Тл, 4,2 К).

#### **Практическая значимость работы**

1. Результаты проведенных исследований использованы для разработки оптимизированных режимов изготовления бронзовых полуфабрикатов для экспериментальной партии  $Nb_3Sn$  стрендов.

2. Разработаны конструкции и технологические режимы изготовления  $Nb_3Sn$  сверхпроводников с бронзовой матрицей, содержащей 15,5-16 мас. % Sn, легированной Ti и Ti + Zr и волокнами из Nb и Nb-Ta.

3. В промышленных условиях по разработанным режимам изготовлены экспериментальные партии  $Nb_3Sn$  сверхпроводников (диаметром 1 мм, содержащих более 19 тыс. Nb волокон) с легированной Ti бронзовой матрицей, содержащей 16 мас. % Sn, и исследованы их электрофизические характеристики (Акт внедрения на АО ЧМЗ от 16.03.2020 г.).

4. Впервые в АО «ВНИИНМ» изготовлена опытная партия  $Nb_3Sn$  сверхпроводников с бронзовой матрицей, содержащей 15,5 мас. % Sn, легированной Ti или Ti + Zr, и волокнами из Nb-Ta сплава, длиной единичных кусков более 1000 м. Определены электрофизические характеристики образцов стрендов от полученных партий в широком диапазоне магнитных полей (12 – 18 Тл при 4,2К, Лаборатория Высоких магнитных полей, Гренобль).

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования влияния методов получения бронзы (дуплекс-процессом, Osprey-технологией и полунепрерывным литьем), содержащей от 14 до 16 мас. % Sn, и легирования Ti и Zr, на ее микроструктуру и механические свойства.

2. Оптимизированные технологические режимы изготовления прутков из высокооловянной легированной бронзы, предназначенных для композиционных сборок, в том числе применительно к промышленным условиям.

3. Разработанные конструкции и технологические режимы изготовления композиционных стрендов на основе Nb<sub>3</sub>Sn с использованием легированной Ti бронзы, содержащей повышенное до 16 мас. % Sn.

4. Результаты исследования влияния легирования (Ti и Ta) на микроструктуру и токнесущую способность многоволоконных Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников с высокооловянной бронзовой матрицей (15,5-16 мас. % Sn) в высоких магнитных полях 12 – 18 Тл.

### **Личный вклад автора.**

Автор лично участвовала в разработке плана исследований, проводила исследования структуры и измерения механических свойств образцов бронзовых полуфабрикатов для Nb<sub>3</sub>Sn стрендов. Приняла непосредственное участие в разработке конструкций и внедрении технологии изготовления стрендов при выпуске опытных и экспериментальных партий Nb<sub>3</sub>Sn стрендов (в АО «ВНИИНМ» и АО ЧМЗ). Выполняла подготовку образцов и их термообработку (РТО) для различных видов исследований при комнатной и криогенной температурах (около 4,2 К). Проводила исследования микроструктуры и состава образцов с использованием различных методов металлографического анализа, включая оптическую и сканирующую электронную микроскопию, и микрорентгеноспектральный и фрактографический анализ.

### **Апробация работы.**

Основные научные результаты диссертационной работы представлены в виде докладов на следующих научно – прикладных конференциях и конкурсах: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, 1 февраля 2010 г.; Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения» Республика Абхазия, Пицунда, 16-21 мая 2010 г.; 29 Бочваровский конкурс, раздел «Молодые ученые и специалисты», г. Москва, ОАО «ВНИИНМ», 2010 г.; I – я Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости (НКПС -2011), Москва, 2011г.; II – я Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости (НКПС -2013), Москва, 2013г., Материалы атомной и ядерной техники (МАЯТ-2014), Звенигород, 2014г.; 31st International symposium on superconductivity (ISS 2018), Цукуба, 12–14 декабря 2018 г.; Материалы атомной и ядерной техники (МАЯТ-2019), Москва, 2019г.; 19-я Международная школа-конференция для молодых ученых и специалистов Новые Материалы: Перспективные

технологии получения и обработки материалов, Москва, 14 – 16 декабря 2021 г.; Материалы ядерной техники (МАЯТ-2025), Москва, 2025г.

#### **Публикации:**

Результаты исследований опубликованы в 14 печатных работах, включая 6 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК и базы данных Web of Science/Scopus, 1 патент РФ на полезную модель, 1 статья, включенная в ядро РИНЦ, 6 публикаций в сборниках трудов российских конференций.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 130 наименований; изложена на 178 страницах машинописного текста, включающего 115 рисунков, 21 таблицу и 3 приложения на 12 листах.

Работа проводилась в рамках государственного контракта на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы между Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» и Акционерным Обществом «Высокотехнологическим научно-исследовательским институтом неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»).

#### **Основное содержание работы**

**В первой главе** содержится обзор литературы, рассмотрены требования к единичным Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводникам (далее стрендам), применяемым в различных магнитных системах и устройствах. Проведен анализ методов получения многоволоконных Nb<sub>3</sub>Sn стрендов. Описаны характерные особенности структуры и свойств высокооловянной бронзы и методы ее получения. Рассмотрены основные способы повышения токонесущей способности Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников.

На основе анализа публикаций была подтверждена цель диссертационного исследования и актуальность решения поставленных научных задач.

**Во второй главе** описаны различные методы получения слитков высокооловянной бронзы: дуплекс-процесс, Osprey - технология, полунепрерывное литье. Представлены методы подготовки образцов литой бронзы для проведения химического анализа (ГОСТ 1953, ГОСТ 1953.17, ГОСТ 1953.9-79), измерения микротвердости (ГОСТ 2999-75), а также для их исследования методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с микрорентгеноспектральным анализом (МРС анализ) (таблицы 1 и 2).

Представлены этапы деформационной обработки слитков бронзы, полученных разными методами, которые включали последовательно: горячую экструзию на гидравлическом прессе усилием 1600 тс, гомогенизационную термообработку и волочение на цепном стане, для получения прутков с разной степенью предварительной деформации.

Таблица 1 – Результаты химического анализа слитков, полученных разными методами: БрО, БрОТ (0,1/0,2/0,25, 0,3%Ti) и БрОТЦр

В массовых долях, %

Слиток		Получены дуплекс-процессом						Получены по Osprey технологии		
		№13-2	№142-2	№151-1	№41	№152-2	№1	№2	№Д42	БД9
Cu	массовая доля, %	Осн.	Осн.	Осн.	Осн.	Осн.	Осн.	Осн.	Осн.	Осн.
Sn		13,8	13,9	13,5	14,2	14,2	15,3	15,1	14,2	16,01
Ti		0,11	0,17	0,18	<0,0003	0,19	0,18	0,24	0,19	0,30
Zr		0,0003	0,0004	0,15	0,0008	0,0008	0,15	0,0008	0,0008	<0,001
Ag		0,0005	0,0005	0,0005	0,0010	0,0010	0,0005	0,001	0,0010	<0,001
Al		0,0004	0,0005	0,0004	0,0012	0,0012	0,0004	0,0012	0,0012	0,002
Gr		0,0004	<0,0001	0,0005	0,0004	0,0004	0,0005	0,0004	0,0004	0,002
Fe		0,0091	0,0048	0,012	0,017	0,017	0,012	0,017	0,017	0,004
Mn		<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,0008	0,0008	<0,0003	0,0008	0,0008	0,01
Ni		<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,0013	0,0013	<0,0003	0,0013	0,0013	<0,001
Bi		0,0014	0,0014	0,0012	<0,0003	<0,0003	0,0012	<0,0003	<0,0003	0,002
Sb		<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,001
Zn		0,0003	0,0007	0,0008	0,0020	0,0020	0,0008	0,002	0,0020	0,02

P, Se, Te, S, Si, Nb, Ca – менее 0,001%, As, Be, Cd, Ba, Mg, Mo, Sr, V - менее 0,003%, Co, Pb - менее 0,005% каждого элемента во всех пробах.

Таблица 2 – Результаты химического анализа прутков бронзы, полученной полунепрерывным литьем

Материал	Место отбора проб	Среднее содержание Sn мас. %
Пруток №1 Ø 8, 0 мм	Осевая зона прутка	14,1 ± 0,1
	Периферийная зона прутка	13,9 ± 0,1
Пруток №2 Ø 8, 0 мм	Осевая зона прутка	15,3 ± 0,1
	Периферийная зона прутка	15,7 ± 0,1

Массовая доля P, Se, Te, S, Si, Nb, Ca – менее 0,001%, As, Be, Cd, Ba, Mg, Mo, Sr, V, Mn, Ni- менее 0,003%, Co, Pb, Fe - менее 0,005% каждого элемента во всех пробах.

Микроструктура и состав образцов бронзовых прутков, была исследована методами оптической и СЭМ микроскопии с MPC анализом на микроскопах Leica DM IRM, Jeol JSM - 7401F и FEI Scios с детектором EDAX Octane Super Elect. Механические характеристики оценивали путём измерений микротвердости по ГОСТ 2999- 75 на микротвердомере Affri DM8, а также испытаний на растяжение при  $T_{комн}$  по ГОСТ 1497-84 на универсальной испытательной машине «TestSystems» УТС 201-5 и при повышенных температурах по ГОСТ 9651-84 на разрывной машине 1246P-2/2300.

Представлены этапы изготовления многоволоконных Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников с бронзовой матрицей с содержанием 15,5 – 16 мас. %Sn, легированной Ti и Zr, и волокнами из Nb или Nb-Ta сплава и РТО для формирования сверхпроводящей фазы.

Приведены методы криогенных испытаний полученных образцов для определения критической температуры ( $T_c$ ) и критического тока ( $I_c$ ) в магнитном поле 12 – 18 Тл при 4,2 К.

**Третья глава** посвящена сравнительному анализу результатов исследований структуры, состава и механических свойств бронзы с 14 – 16 мас. % Sn, полученной разными методами: дуплекс-процессом, Osprey-технологией и полунепрерывным литьем.

Повышение содержания Sn в бронзе значительно снижает ее деформируемость и приводит к усложнению технологического процесса. Это связано с формированием хрупких фаз, которые существенно ограничивают возможность пластической деформации бронзовых полуфабрикатов и композиционной заготовки в целом. Поэтому для обеспечения технологичности такой бронзы требуется разработка методов её получения.

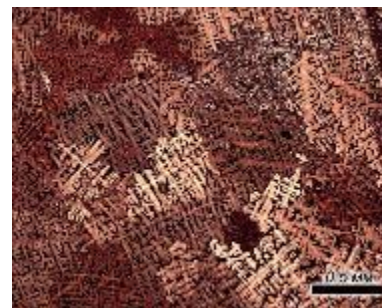
Анализ микроструктуры бронзы с содержанием от 14 до 15,5 мас. % Sn, полученной дуплекс-процессом, в литом состоянии (рисунок 1), показал, что она состоит из  $\alpha$ -твердого раствора с включениями эвтектоида ( $\alpha + \delta$ ).



а –  $\frac{1}{2}$  радиуса



б – включения эвтектоида



в – зеренная структура

Рисунок 1 – Фрагменты микроструктуры поперечного сечения образцов слитка  $\varnothing$  180 мм нелегированной бронзы № 41(БрО14) в литом состоянии (дуплекс-процесс)

При этом отмечена неоднородность микроструктуры: при приближении к центру слитка увеличивается размер включений эвтектоида, и формируются крупные зёрна с выраженной дендритной ликвацией (рисунок 1в).

Поскольку одним из перспективных методов повышения  $J_c$   $Nb_3Sn$  стрендов в сильных магнитных полях является легирование сверхпроводящего слоя Ti и другими элементами, то в работе было проведено исследование влияния различного содержания Ti, и комплексного легирования Ti + Zr на структуру и свойства бронзы.

Зеренная структура легированной Ti и Zr бронзы, полученной дуплекс-процессом, представлена на рисунке 2.

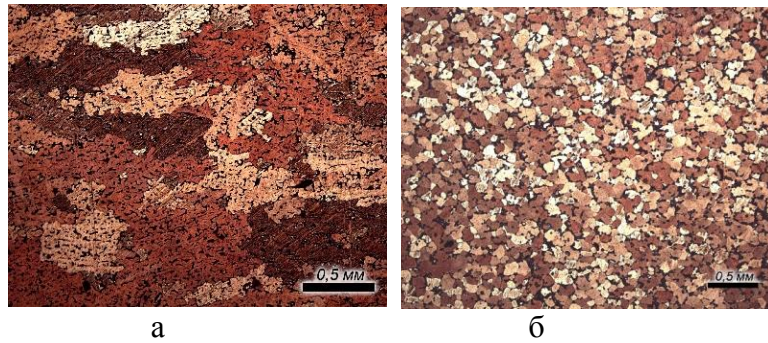
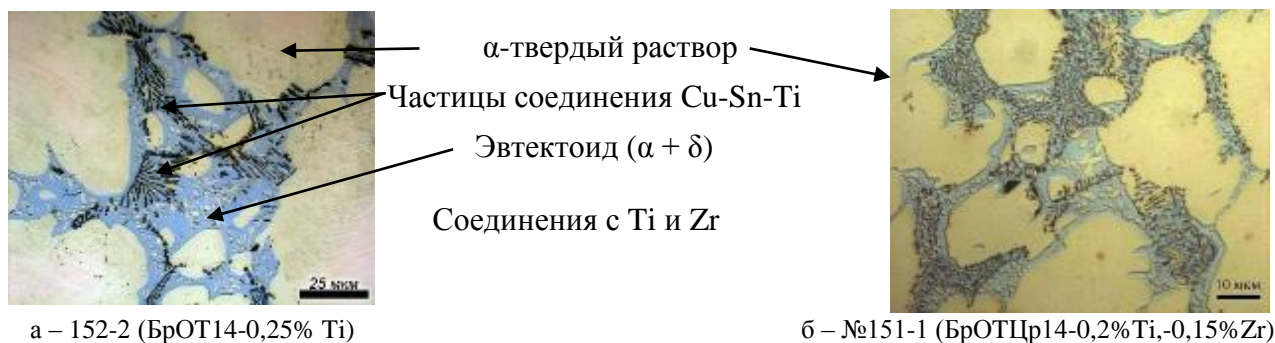


Рисунок 2 – Микроструктура образцов бронзы, полученной дуплекс – процессом:  
а) № 14-2 (BrO14-0,2% Ti); б) №151-1 (BrO14-0,2% Ti,-0,15% Zr)

Показано, что дополнительное введение Zr оказывает значительное модифицирующее воздействие и приводит к уменьшению среднего размера зерна более чем в 5 раз (с 200 до 40 мкм).

При анализе микроструктуры установлено, что Ti присутствует в бронзе в виде тройных соединений Cu-Sn-Ti (рисунок 3 а). МРС анализ показал, что эти частицы содержат от 14 до 20 мас. % Ti и до 45 мас. % Sn. Во всем диапазоне исследуемых составов частицы тройного соединения имеют преимущественно вытянутую (игольчатую) форму (рисунок 3а).



а – 152-2 (BrOT14-0,25% Ti)

б – №151-1 (BrOTЦp14-0,2%Ti,-0,15%Zr)

Рисунок 3 – Микроструктура частиц второй фазы в образцах от слитков бронзы разных составов

Также отмечено, что введение Zr в бронзу, легированную Ti, приводит к появлению ажурной структурной составляющей, расположение которой совпадает с эвтектоидом. Кроме того, отмечено, что частицы приобретают округлую форму (рисунок 3б), а их состав соответствует интерметаллидам системы Cu-Zr, например, таких как  $Cu_9Zr_2$ , хотя не исключено формирование более сложных соединений Cu – Sn – Zr – Ti, поскольку по результатам МРС анализа установлено, что в составе таких включений находится до 8 мас. % Zr и Ti. Кроме этих частиц, по границам зерен также обнаружено много дисперсных темно – серых включений, которые, учитывая высокое химическое сродство циркония к кислороду, могут представлять собой оксиды циркония. Данные частицы, вероятно, играют роль барьеров, тормозящих миграцию границ и ограничивающих рост зёрен  $\alpha$ -твёрдого раствора, что способствует измельчению зеренной структуры.

В таблице 3 представлены результаты сравнительного анализа размеров эвтектоидных включений в нелегированной и легированной Ti и Zr бронзе.

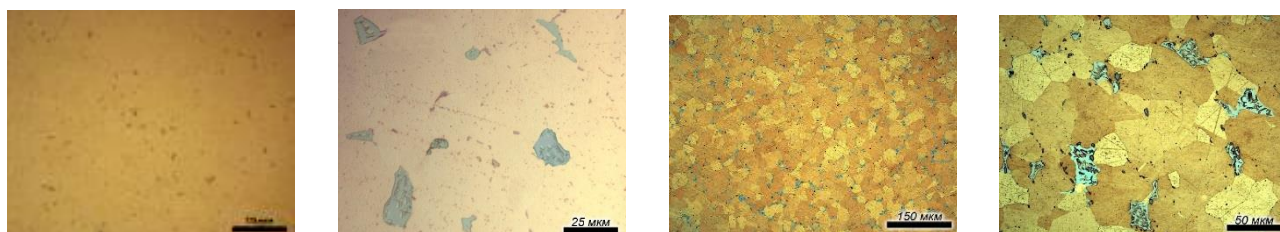
Таблица 3 – Параметры микроструктуры образцов бронзы: БрО, БрОТ (0,1/0,2/0,25%Ti) и БрОТЦр

Партия	Дуплекс-процесс									
	№41 БрО14		№13-2 БрОТ14-0,1% Ti		№14-2 БрОТ14-0,2% Ti		№152-2 БрОТ14-0,25% Ti		№151-1 БрОТЦр14-0,2% Ti-0,15%Zr	
	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край
Максимальный размер эвтектоидных включений, мкм	75±5	50±6	70±4	42±3	68±3	40±2	60±5	37±3	55±4	35±3
Характерный размер эвтектоидных включений, мкм	45±5	35±5	38±3	24±4	35±5	20±4	30±3	15±2	25±2	12±3
Характерный размер тройных соединений, мкм	-	-	6±1	5±1	8±1	7±2	10±1	11±2	<1	<1

Легирование Ti бронзы, полученной дуплекс-процессом, приводит к уменьшению характерного размера эвтектоидных включений, причем с увеличением содержания Ti (с 0,1 до 0,25 мас. %) их размер уменьшается (так, при 0,25 мас. %Ti размер уменьшился на 15-20 мкм) (таблица 3). Дополнительное введение Zr позволило снизить размер частиц еще на 7 – 10 мкм, а размер включений, образованных легирующими элементами, уменьшился в 8 раз по сравнению с бронзой, легированной только Ti.

Для устранения дендритной ликвации и повышения пластичности бронзовых заготовок, полученных дуплекс - процессом, а также максимального растворения включений хрупкого эвтектоида, был проведен гомогенизационный отжиг. Установлено, что в результате отжига при 700 °С, 24 ч во всех легированных и нелегированных слитках происходит полное растворение эвтектоида, а включения, образованные легирующими элементами, остаются без изменения.

Одним из перспективных методов получения оловянных бронз, который используется за рубежом для создания однородной структуры, является Osprey-технология. Микроструктура образцов бронзы, различного состава, полученной этим методом, представлена на рисунках 4 (а, б).



а – Cu-14,2 мас. % Sn-0,2 мас.%Ti (Партия № Д42)

б – Cu-16 мас. % Sn-0,3 мас. % Ti (Партия №БД 9)

Рисунок 4 – Фрагменты микроструктуры образцов бронзы, полученной по Osprey-технологии, двух составов

Отмечено, что микроструктура бронзы, полученной по Osprey-технологии (рисунок 4), характеризуется наличием небольших включений эвтектоида, которые располагаются по

границам зерен. Кроме того, присутствуют частицы, содержащие Ti (соединение Cu-Sn-Ti), которые располагаются на границах и внутри зерен. Частицы эвтектоида и тройных соединений распределены равномерно по сечению слитка. Параметры микроstructures образцов легированной бронзы, полученной по Osprey-технологии двух составов (с 14 и 16 мас. % Sn), представлены в таблице 4. Анализ результатов показывает, что эти слитки бронзы, даже с повышенным до 16 мас. % содержанием Sn, характеризуются гораздо более однородной структурой по сравнению с дуплекс-процессом. При этом выявлено не только уменьшение количества эвтектоидных включений, но и значительное снижение их размера (максимум 20 - 25 мкм), что позволяет проводить дальнейшую пластическую деформацию прутков без предварительного гомогенизирующего отжига.

Таблица 4 – Параметры микроstructures образцов бронзы, полученной по Osprey-технологии

Партия	№Д42 БрОТ14-0,2% Ti		№БД9 БрОТ16-0,3% Ti	
	центр	край	центр	край
Максимальный размер эвтектоидных включений, мкм	1	2	2	3
Характерный размер эвтектоидных включений, мкм	1	2	1	2
Характерный размер тройных соединений, мкм	1	1	1	1

Процесс изготовления прутков из слитков бронзы для первой многоволоконной сборки, полученной как Дуплекс – процессом, так и по Osprey-технологии, является многоступенчатым и включает в себя несколько операций механической обработки: два горячих прессования и волочение с промежуточными отжигами. Одним из вариантов, позволяющим сократить технологическое время получения бронзовых заготовок, является метод полунепрерывного литья. Преимущество этого подхода заключается в возможности получения бронзовых прутков напрямую при вытяжке из расплава, при этом можно сразу получить требуемый для сборки композиционной заготовки размер. Микроstructure прутков, полученных полунепрерывным литьем с содержанием Sn 14 мас. %, представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Характерная микроstructure поперечного и продольного сечения бронзового прутка №1 (с 14 мас. % Sn), полученного полунепрерывным литьем

В прутках, полученных методом полунепрерывного литья, наблюдается однородное распределение включений эвтектоида размером 30 – 35 мкм. Исследование влияния режимов

гомогенизации полученных прутков на их структуру показало, что уже после отжига при 650 °С, 12 ч, происходит полное растворение эвтектоида и структура представляет собой однофазный  $\alpha$ -твердый раствор. Таким образом, установлено, что по сравнению с гомогенизационным отжигом слитков, полученных по дуплекс-процессу, для прутков, изготовленных полунепрерывным литьем (с содержанием 14 мас. % Sn) время отжига можно уменьшить в 2 раза (с 24 до 12 часов) и снизить температуру с 700 до 650 °С.

Однако увеличение содержания Sn до 15,5 мас. % в прутках, полученных полунепрерывным литьем, приводит к заметному росту эвтектоидных включений до 40 – 45 мкм. При этом на поверхности прутков образуется сплошной слой эвтектоида толщиной около 40 мкм, который не устраняется при гомогенизации, что препятствует деформации прутков из-за растрескивания, и требует изменения технологии полунепрерывного литья (применение электромагнитного или ультразвукового воздействия на расплав и др.).

*Механические свойства.* Проведены сравнительные исследования зависимости механических свойств образцов бронзы, полученной Дуплекс-процессом и Osprey – технологией, с суммарной накопленной степенью относительной деформации от 10 до 50 %. Промежуточную термообработку проводили при температурах от 300 до 600 °С.

Установлено, что после отжига при 500 °С, разница в значениях  $\sigma_0$  для прутков из бронзы с разной относительной деформации (от 10 до 50%) становится минимальной, независимо от метода получения. При этом можно восстановить пластичность прутков ( $\delta$ ) до 45-55%.

На основании результатов этих исследований с целью унификации технологии при производстве сверхпроводников, была рекомендована температура для промежуточных отжигов как бронзовых, так и композиционных прутков 500 °С.

Также было установлено, что максимально возможная суммарная деформации между промежуточными термообработками бронзовых прутков, полученных по дуплекс-процессу, не должна превышать 50%. Поскольку при достижении данного уровня деформации происходит существенное снижение пластичности ( $\delta$  менее 1%) и начинается трещинообразование, обусловленное накоплением критического уровня внутренних напряжений.

Установлено, что при применении Osprey-бронзы, рекомендуемая суммарная деформации до отжига должна быть снижена, и составлять не более 40%, поскольку превышение этого уровня приводит к растрескиванию. Это связано с тем, что в данном случае, из-за быстрого охлаждения расплава при кристаллизации, происходит ускоренный распад пересыщенного твердого раствора, приводящий к активному образованию  $\epsilon$ -фазы. Это способствует упрочнению бронзы и повышает ее предрасположенность к растрескиванию при деформации.

Для разработки режимов прессования бронзовых прутков проведены исследования зависимости механических свойств от температуры в интервале от 200 до 600 °С (рисунок 6).

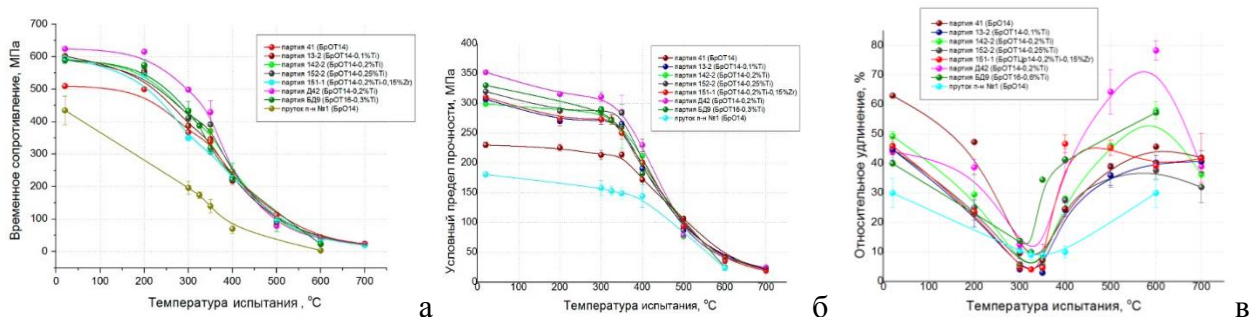
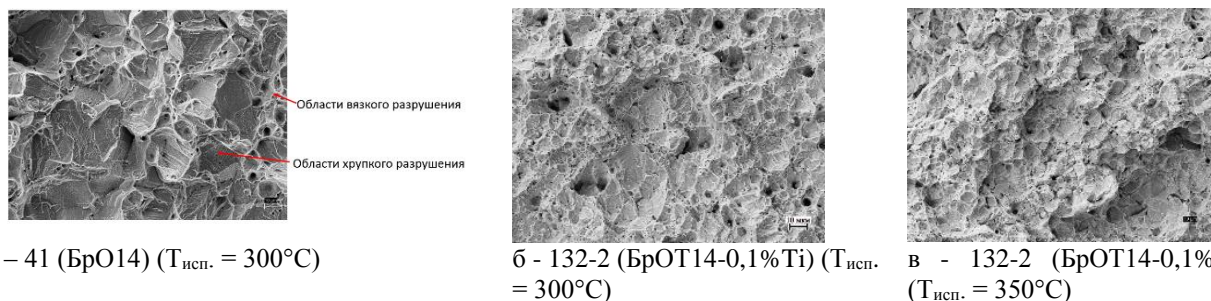


Рисунок 6– Зависимость  $\sigma_v$  (а),  $\sigma_{0,2}$  (б) и  $\delta$  (в) от температуры испытаний образцов бронзы, полученной разными методами: дуплекс-процессом (партии 41, 13-2, 142-2, 152-2, 151-1); по Osprey-технологии (партии Д42, БД9); полунепрерывным литьем (партия №1)

Анализ зависимостей (рисунок б а, б) прочностных характеристик ( $\sigma_v$  и  $\sigma_{0,2}$ ) образцов из бронзы разного состава и способов выплавки от температуры испытания показал, что образцы из бронзы, полученные полунепрерывным литьем, имели самые низкие значениями  $\sigma_v$  и  $\sigma_{0,2}$  во всем интервале температур.

Выявлено, что во всех образцах бронзы, независимо от способа ее получения и легирования, при температуре испытания 300-350 °С наблюдается резкое снижение относительного удлинения (провал пластичности) (рисунок бв). В интервале температур, где наблюдается провал пластичности, характер разрушения сильно меняется: присутствуют области как вязкого, так и хрупкого излома (рисунок 7).



а – 41 (BrO14) ( $T_{исп.} = 300^{\circ}C$ )

б - 132-2 (BrOT14-0,1%Ti) ( $T_{исп.} = 300^{\circ}C$ )

в - 132-2 (BrOT14-0,1%Ti) ( $T_{исп.} = 350^{\circ}C$ )

Рисунок 7 – Фрагменты микроструктуры изломов образцов бронзы при различных температурах испытаний (СЭМ)

На основании комплексного анализа микроструктуры и механических свойств бронзы, полученной различными методами, для изготовления опытных партий многоволоконных стрендов с повышенной токонесущей способностью в качестве матрицы была выбрана высокооловянная бронза (с содержанием Sn 15,5 – 16 мас. %), легированная Ti или Ti+Zr, полученная как по Osprey-технологии, так и дуплекс-процессом. Прутки бронзы аналогичного состава, полученные методом полунепрерывного литья, разрушались при деформации из-за наличия слоя хрупкого эвтектоида на поверхности прутков, и в данной работе для получения композиционных сборок бронза, полученная методом полунепрерывного литья, не применялась.

**Четвертая глава** посвящена разработке конструкций и технологических режимов изготовления  $Nb_3Sn$  стрендов с использованием Osprey – бронзы с 16 мас. % Sn.

Разработаны две экспериментальные конструкции стрендов, параметры которых представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики экспериментальных стрендов партий ДМ

Партия	ДМ1	ДМ1,5
Диаметр стренда, мм	1	
Объемная доля Cu (КЗ <sub>Cu</sub> , %)	50 %	
Состав бронзовой матрицы	Cu-16 мас. % Sn-0,3 мас. % Ti (Партия БД 9)	
Объемная доля Nb (КЗ <sub>Nb</sub> , %)	31,5	
Диаметр волокна, мкм	2,0	1,5
Общее количество волокон	19893	39132

Для оценки влияния деформации на механические характеристики образцов ДМ1 и ДМ1,5, проведено исследование образцов, полученных при волочении с  $\varnothing$  2,76 на  $\varnothing$  2,10 мм до достижения максимально возможной суммарной степени деформации ~42 % (рисунок 8). Дальнейшее деформирование образцов приводило к их разрушению.

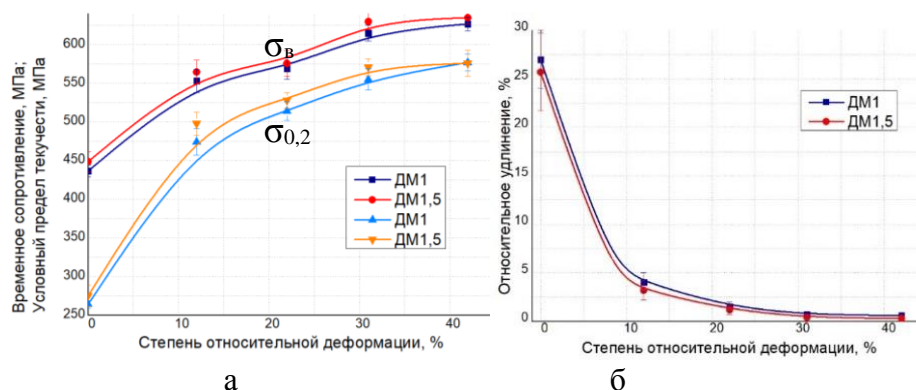


Рисунок 8 – Сравнение зависимостей временного сопротивления, условного предела текучести (а) и относительного удлинения (б) от степени деформации образцов партий ДМ1,0 и ДМ1,5

Полученные результаты (рисунок 8) показали, что при волочении запас пластичности более 1 % сохраняется до максимальной степени деформации 20-30%. Установлено, что величина относительного удлинения при температуре 500 °С восстанавливается и составляет 27÷28 %, поэтому эта температура была рекомендована как оптимальная для промежуточных термообработок.

При сравнении изменения временного сопротивления при волочении (рисунок 9а) с диаметра 2,70 до 1,4 мм на образцах двух партий отмечено, что значения  $\sigma_B$  для них близки и достигают на каждом переходе 575-615 МПа.

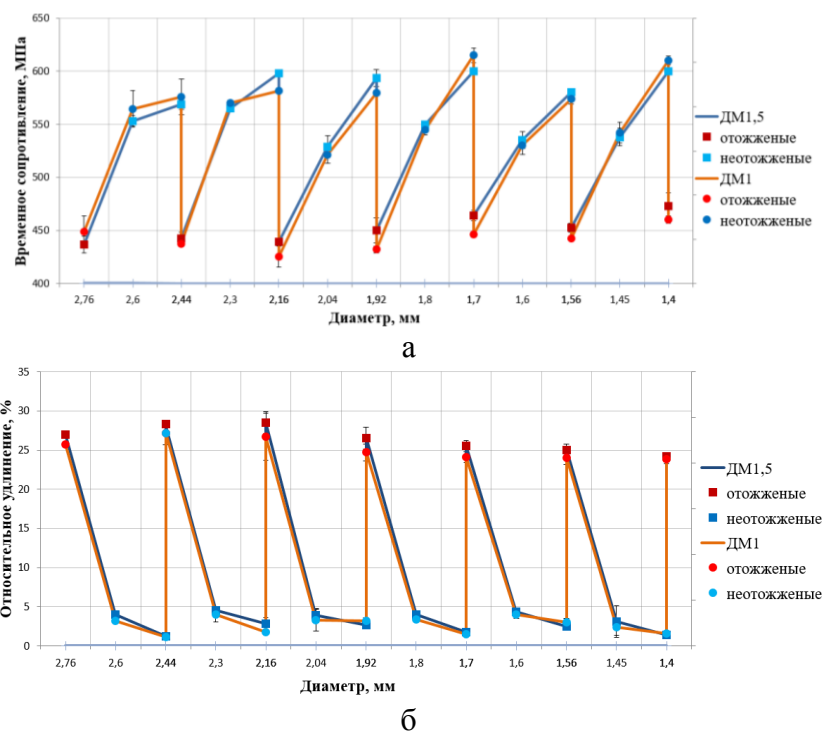


Рисунок 9 – Сравнение изменения временного сопротивления (а) и относительного удлинения (б) при волочении проводников ДМ1 и ДМ1,5

Анализ полученных зависимостей (рисунок 9) показал, что они аналогичны для образцов обеих партий. Разработанный маршрут волочения является оптимальным, с точки зрения производительности позволяющим получать провод без обрывов.

В АО «ВНИИНМ» были изготовлены экспериментальные партии композиционных прутков, аналогичной конструкции диаметром 35 мм, отличающиеся диаметром волокон (см. таблицу 5, ДМ1 и ДМ1,5), с бронзовой матрицей с 16 мас. % Sn, которые были переданы на промышленное предприятие АО ЧМЗ для дальнейшего изготовления стрендов до готового размера. В результате были успешно опробованы рекомендованные режимы деформации и изготовлены стренды ДМ 1 и ДМ1,5 диаметром 1 мм и длиной единичных кусков более 3 км.

При анализе микроструктуры (рисунок 10) было обнаружено, что в бронзовой матрице присутствуют частицы тройного соединения Cu-Sn-Ti, размером до 1 мкм, что, в образцах ДМ1,5 с волокнами меньшего размера (~ 1,5 мкм), в отдельных случаях, приводило к их искажению и даже перерезанию. Поэтому было рекомендовано, чтобы размер волокон был не менее 2 мкм.

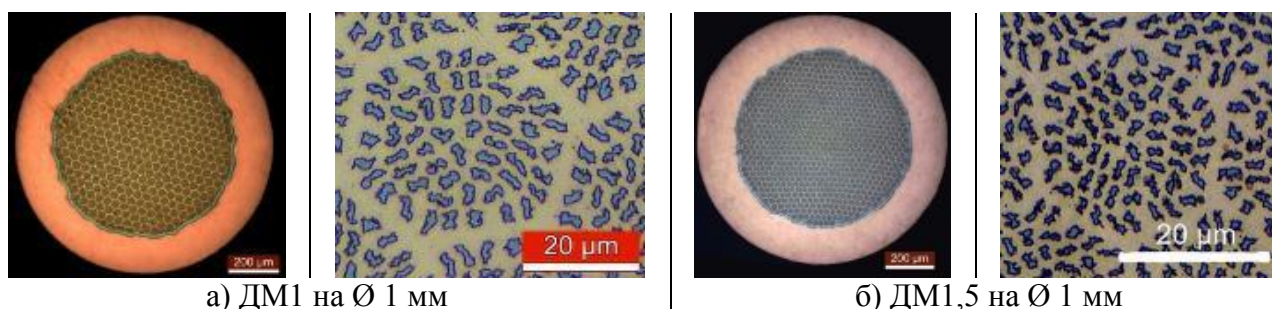


Рисунок 10 – Общий вид и фрагменты поперечного сечения образцов партий ДМ1 и ДМ1,5

Для оптимизации режимов реакционной термической обработки (РТО), было исследовано влияние температуры на морфологию зеренной структуры  $Nb_3Sn$  слоя в полученных образцах, а также сравнение их структуры с образцами стрендов для ИТЭР, изготовленных с использованием бронзы с меньшим содержанием Sn – 14,5мас. % (рисунок 11).

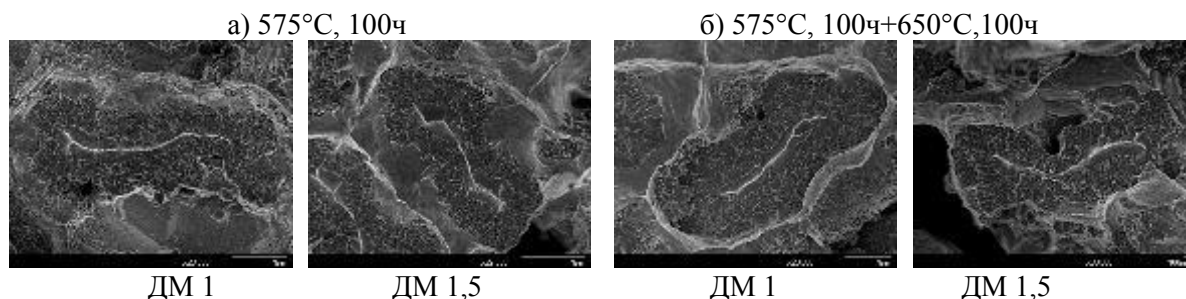


Рисунок 11– Фрагменты микроструктуры поверхности излома образцов стрендов ДМ1 и ДМ1,5 диаметром 1,0 мм на различных стадиях РТО (СЭМ)

Выявлено, что слои  $Nb_3Sn$  состоят, из двух концентрических зон, отличающихся формой зерен: столбчатые и равноосные (рисунок 11). В зоне равноосных зерен, которая располагается на границе с бронзовой матрицей, наблюдается разброс по размерам: от мелких в середине до крупных вблизи границы с бронзой. Зона столбчатых зерен примыкает к остаточному ниобию (рисунок 11).

Проведен количественный анализ зеренной структуры сверхпроводящей фазы (таблица 6) для образцов двух партий (ДМ1 и ДМ1,5) и для стрендов ИТЭР после РТО.

Таблица 6 – Результаты количественных исследований зеренной структуры сверхпроводящего слоя

Образец	Объемная доля равноосных зерен, %	Объемная доля остаточного ниобия, %	Доля слоя столбчатых зерен, %	Средний размер равноосных зерен, нм	Коэф. столбчатости
<b>ТО 575 °С, 100ч</b>					
ДМ1	53	21	26	70±7	2,5
ДМ1,5	54	19	27	50±5	3
<b>ТО 575°С100ч+650°С,100ч</b>					
ДМ1	57	12	31	77±6	2,5
ДМ1,5	56	11	33	54±5	3
ИТЭР	45	16	39	76±8	2,5

Анализ результатов, представленных в таблице 6, позволил установить, что сверхпроводящие слои в образцах ДМ1 и ДМ1,5 характеризуются одинаковой объемной долей равноосных зерен (53-54%) после первой стадии РТО при 575 °С, 100 ч. Проведение второй ступени РТО при 650 °С,100 ч привело к увеличению в них доли равноосных зерен на 2 – 4%. При сравнении с образцами ИТЭР (с меньшим содержанием Sn, таблица 6), было установлено, что при увеличении содержания Sn в опытных образцах наблюдается рост доли равноосных зерен в  $Nb_3Sn$  слое на ~12% и снижение как доли столбчатых зерен, так и доли остаточного Nb на ~12 %.

Кроме того, анализ зависимости (рисунок 12) размера зерен  $Nb_3Sn$  от диаметра волокна в этих образцах (для ИТЭР, ДМ1 и ДМ1,5) после РТО показал, что с уменьшением диаметра снижаются и размеры зерен.

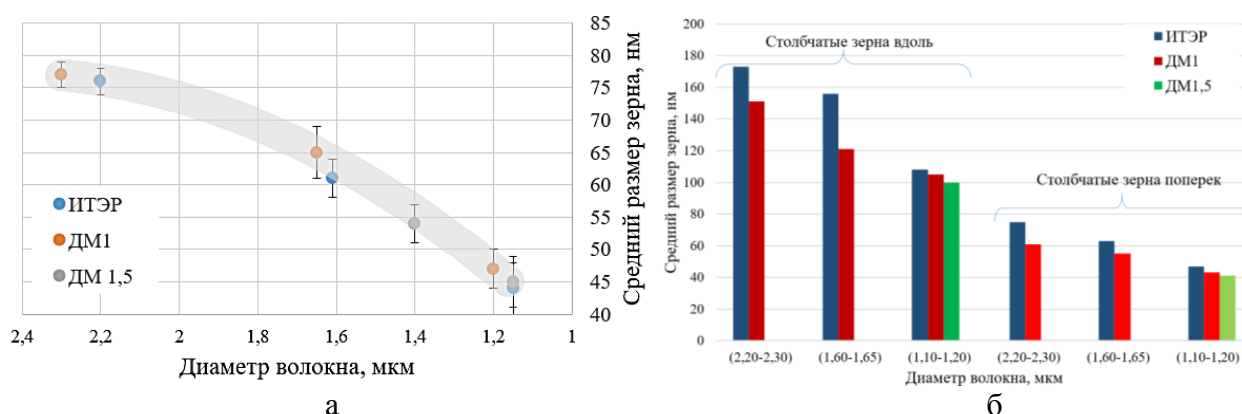


Рисунок 12 – Зависимость среднего размера зерен в различных зонах: равноосных зерен (а) и столбчатых зерен (б) от диаметра  $Nb_3Sn$  волокон в образцах стрендов ДМ1, ДМ1,5 и ИТЭР после РТО по режиму: 575 °С, 100 ч + 650 °С, 100 ч

При этом коэффициент столбчатости (отношение их длины к ширине) почти не меняется (рисунок 12б, таблица 6). Отмечено также, что увеличение содержания Sn до 16 мас. % не привело к изменению размеров равноосных зерен  $Nb_3Sn$  по сравнению с образцами для ИТЭР.

После РТО образцов от партий ДМ1 и ДМ 1,5 по режиму: 575°С100ч+650°С,100ч были проведены измерения критических характеристик в магнитном поле 12 Тл при 4,2 К. На образце ДМ1 достигнуто максимальное значение плотности критического тока 885 А/мм<sup>2</sup>, что на 15 % выше по сравнению с образцами для ИТЭР.

В ходе исследований была успешно разработана и апробирована в промышленных условиях технология изготовления  $Nb_3 Sn$  стрендов с рекордно высоким содержанием олова (до 16 мас. %) в бронзовой матрице. Установлено, что увеличение содержания Sn с 14 до 16 мас. % приводит к значительному улучшению микроструктуры сверхпроводящего слоя: росту доли равноосных зёрен и уменьшению доли столбчатых зёрен и остаточного ниобия. В результате, для экспериментальных стрендов была достигнута плотность критического тока 885 А/мм<sup>2</sup> (в магнитном поле 12 Тл при 4,2 К). Таким образом, реализованная технология продемонстрировала возможность создания  $Nb_3 Sn$  стрендов с повышенным содержанием Sn в бронзовой матрице для применения в сильных магнитных полях.

**В пятой главе** представлены результаты исследования влияния двойного легирования  $(Nb,Ta,Ti)_3Sn$  стрендов с повышенным содержанием Sn в бронзе на их структуру и сверхпроводящие свойства.

Были разработаны конструкции (с маркировкой «Т») и изготовлены опытные партии стрендов диаметром 1 мм, с волокнами из сплава Nb-Ta. Образцы отличались содержанием

тантала в сплаве на основе ниобия: Т3 — 3,5 мас. %, Т7 — 7,0 мас. %. Длина единичных кусков составляла более 1 км. Характеристика компонентов образцов Т3 и Т7 представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристика образцов опытных стрендов Т3 и Т7

Партия	Т3	Т7
Диаметр стренда, мм	1	
Объемная доля Cu ( $K_{Cu}$ , %)	18%	
Состав бронзовой матрицы	Cu-15,5мас.%Sn-0,25мас.%Ti	Cu-15,5мас.%Sn-0,2мас.%Ti-0,2мас.%Zr
Состав волокон	Nb-3,5мас.%Ta	Nb-7,0мас.%Ta
Объемная доля Nb ( $K_{Nb}$ , %)		
Общее количество волокон	34203	
Диаметр волокна (расчетный на диаметре стренда 1 мм), мкм	2,7	

Легирование Ta и Ti может по-разному влиять на формирование структуры фазы  $Nb_3Sn$ , для увеличения  $J_c$ , необходимо провести оптимизацию режима РТО. На первой стадии, при которой происходило формирование мелкозеренной структуры  $Nb_3Sn$  слоя, режим оставался неизменным: 575 °С, 100 ч. А на второй высокотемпературной стадии, на которой происходит увеличение толщины  $Nb_3Sn$  слоя и приближение его состава к стехиометрическому, были опробованы следующие режимы: при 650 °С с выдержкой 100 ч и 200 ч, а также 680, 700, 720 °С с выдержкой 100 ч.

Микроструктура слоев  $Nb_3Sn$  после различных режимов РТО была изучена методом фрактографического анализа (рисунок 13).

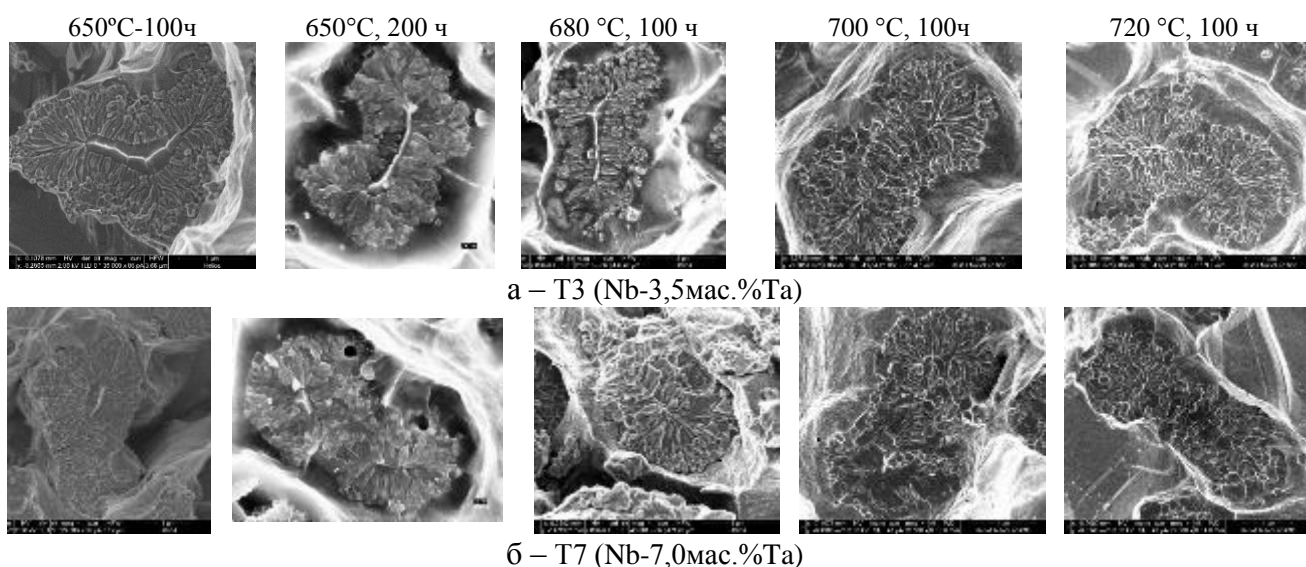


Рисунок 13 –Микроструктура  $Nb_3Sn$  слоя стрендов Т3 и Т7 после РТО по различным режимам

Результаты анализа микроструктуры образцов Т3 и Т7 после различных режимов РТО, представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты количественных исследований зеренной структуры сверхпроводящего слоя после различных режимов РТО

Режим РТО (575°C,100ч+Х)	Т3			Т7		
	Доля равноосных зерен, %	Доля столбчатых зерен, %	Ср. размер зерна, нм	Доля равноосных зерен, %	Доля столбчатых зерен, %	Ср. размер зерна, нм
650°C,100ч	44,4	49,5	84±10	54,5	40,6	84±10
650°C,200ч	55,0	36,5	71±8	55,6	39,1	75±9
680°C,100ч	59,0	35,9	96±3	57,3	36,6	77±4
700°C,100ч	65,4	33,9	107±7	75,6	22,9	93±11
720°C,100ч	72,7	26,2	111±14	80,1	19,4	107±13

Анализ полученных результатов позволил установить, что при повышении температуры второй ступени с 650 до 720 °С зона остаточного Nb уменьшается, и при 700 °С наблюдается практически полное превращение волокон в фазу Nb<sub>3</sub>Sn (рисунок 13). Также отмечен рост доли равноосных зерен, который в среднем для двух партий составил 27% (таблица 8).

Установлено, что при температуре второй ступени 700 °С и выше, образец с повышенным содержанием тантала (Т7) характеризуется большей долей равноосных зёрен (в среднем на 9%) и, соответственно, меньшей долей столбчатых по сравнению с образцом Т3, при близких значениях среднего размера зерна (~100 нм) (таблица 8).

С повышением температуры второй ступени РТО наблюдается увеличение среднего размера зерна сверхпроводящей фазы в обеих партиях. Наиболее интенсивный рост зерна наблюдался в интервале 700 – 720 °С, что является негативным фактором, способным снижать  $J_c$  вследствие уменьшения плотности границ зёрен – основных центров пиннинга. Однако при повышении температуры второй ступени до 720 °С в сверхпроводящем слое образцов Т3 и Т7 возросло содержание Sn с 20,2-20,3 до 21,2-22,1 ат. %, что благоприятно для роста  $V_{c2}$  и соответственно для достижения высоких значений  $J_c$  в сильных магнитных полях.

Зависимость  $J_c$  от магнитного поля образцов Т3 и Т7 (в сравнении со стрендами для ИТЭР) представлена на рисунке 14.

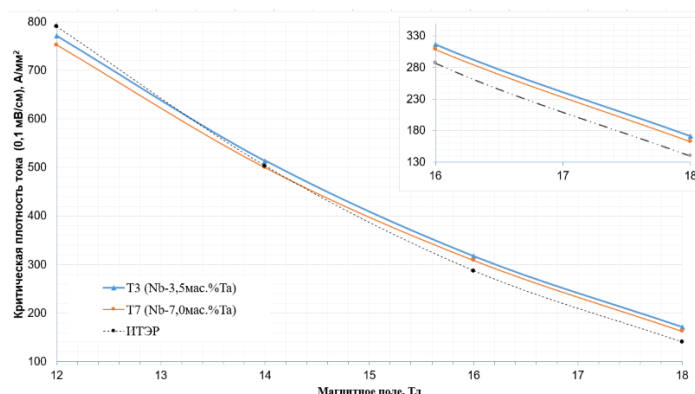


Рисунок 14 – Зависимость  $J_{c\text{nonCu}}$  от магнитного поля при 4,2 К для стрендов Т3, Т7 (Ø 1 мм) и ИТЭР (Ø 0,82 мм), после РТО по режиму: 575°C, 100 ч + 650°C, 200 ч

\* Для образцов партии ИТЭР зависимость  $J_{c\text{nonCu}}$  от магнитного поля в диапазоне магнитных полей 16-18 Тл, рассчитана по функции Крамера

Как видно на рисунке 14, образцы диаметром 1,0 мм с содержанием Ta 3,5 и 7,0 мас. % с повышенным содержанием Sn в бронзовой матрице (15,5 мас. %) имеют близкие значения  $J_c$  в диапазоне магнитных полей от 12 до 18 Тл при 4,2 К, при этом отмечено, что в полях выше 16 Тл эти значения на ~15% выше, чем для образцов ИТЭР.

Результаты измерения критического тока и плотности критического тока были применены для оценки  $B_{c2}$  стрендов с использованием линейной экстраполяции по функции Крамера и полевой зависимости силы пиннинга (рисунок 15).

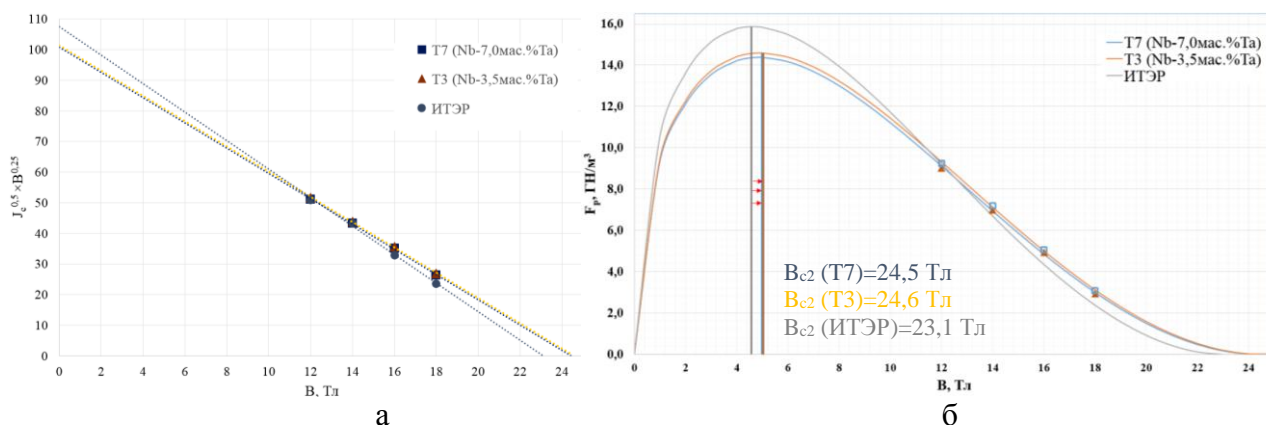


Рисунок 15 – Функция Крамера, построенная по данным  $J_c(B)$  (а) и полевая зависимость силы пиннинга образцов стрендов

Результаты анализа (рисунок 15) показали, что легирование Ta не только увеличивает значение  $B_{c2}$  на 1,5 Тл (составляя 24,6 Тл и 24,5 Тл для партий Т3 и Т7 соответственно), но и смещает пик зависимости  $F_p(B)$  в область более сильных магнитных полей.

На основе проведённого комплексного исследования микроструктуры и электрофизических свойств опытной партии  $Nb_3 Sn$  сверхпроводников с повышенным содержанием олова (15,5 мас. %) в бронзовой матрице были получены данные, подтверждающие эффективность совместного легирования Ti+Ta.

Таким образом, легирование Ti+Ta позволило увеличить  $J_c$  на 15% и верхнее критическое поле ( $B_{c2}$ ) на 1,5 Тл, по сравнению со стрендами для ИТЭР в высоких магнитных полях (до 18 Тл), что, в целом, не только улучшает эксплуатационные характеристики  $Nb_3 Sn$  проводников, но и подтверждает их перспективность для использования при создании магнитов для сильных магнитных полей (>12 Тл).

## Заключение

Проведены комплексные исследования, направленные на повышение электрофизических характеристик стрендов, получаемых бронзовым методом, в магнитных полях выше 12 Тл.

Исследовано влияние методов выплавки слитков бронзы с повышенным содержанием олова (14 – 16 мас. %) и легирования (Ti и Zr) на микроструктуру и механические свойства бронзы как в литом, так и деформированном состоянии. Установлено, что применение Osprey-технология позволяет уменьшить размер эвтектоидных включений в 2–3 раза по сравнению с дуплекс-процессом и полунепрерывным литьем, исключая необходимость гомогенизации. Легирование Ti (0,10 – 0,25 мас. %) уменьшает размер включений эвтектоида в бронзе на 44%, а дополнительное введение Zr способствует сокращению размер эвтектоида на 33% по сравнению с бронзой, легированной только Ti.

Определены оптимальные режимы термомеханической обработки бронзовых и композиционных прутков для изготовления Nb<sub>3</sub>Sn стрендов из бронзы с содержанием Sn до 16 мас.%. Установлено, что:

- температура промежуточных термообработок в процессе деформации прутков должна составлять 500 °С, как для бронзовых, так и для композиционных прутков, т.е. может быть унифицирована;

- степень деформации между отжигами не должна превышать 50% для прутков из высокооловянной бронзы, полученной по дуплекс-процессу, и 40% для прутков, полученных по Osprey-технологии.

Проведен расчет и разработаны конструкции многоволоконных Nb<sub>3</sub>Sn стрендов с бронзовой матрицей, содержащей 15,5 – 16 мас. % Sn, легированной Ti и Zr. В промышленных условиях успешно апробирована технология изготовления Nb<sub>3</sub>Sn стрендов с рекордно высоким содержанием олова (до 16 мас. %) в бронзовой матрице. По разработанным режимам изготовлены экспериментальные партии Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников диаметром 1 мм, содержащих более 19 тыс. Nb волокон, с длиной кусков более 3 км. Показано, что увеличение содержания Sn в матрице Nb<sub>3</sub>Sn стрендов с 14 до 16 мас. % приводит к увеличению доли равноосных зерен (на ~12%) в сверхпроводящем слое, а также к сокращению доли столбчатых зерен и доли остаточного ниобия (~12%). В результате, для экспериментальных стрендов была достигнута плотность критического тока 885 А/мм<sup>2</sup> (в магнитном поле 12 Тл при 4,2 К). Реализованная технология продемонстрировала возможность создания Nb<sub>3</sub>Sn стрендов с повышенным содержанием Sn в бронзовой матрице для применения в сильных магнитных полях.

Проведено исследование влияния совместного легирования – ниобиевых волокон Ta и бронзовой матрицы с высоким содержанием олова Ti и Zr, - на особенности микроструктуры сверхпроводящего Nb<sub>3</sub>Sn слоя и электрофизические свойства готовых стрендов. В условиях цеха

АО «ВНИИНМ» изготовлена опытная партия  $Nb_3Sn$  стрендов с бронзовой матрицей, содержащей 15,5 мас. % Sn, диаметром 1 мм с более 34 тыс. волокон и длиной единичных кусков более 1 км.

На основе анализа результатов электрофизических измерений, полученных стрендов в полях 12 - 18 Тл установлено, что легирование Ta не только увеличивает значение  $B_{c2}$  на 1,5 Тл, но и смещает пик зависимости  $F_p(B)$  в область более сильных магнитных полей. Повышенное содержание Sn в бронзовой матрице, легированной Ti, в комплексе с легированием ниобиевых волокон Ta позволяет повысить токнесущую способность стрендов при в магнитных полях выше 16 Тл и достичь величины плотности тока  $J_c$  (в поле 18 Тл, 4.2К) на 15% выше, чем в стрендах для ИТЭР.

## Список публикаций по теме диссертации

1. **Трактирникова Н.В.** Разработка способов повышения качества высокооловянной бронзы для увеличения токонесущей способности  $Nb_3Sn$  сверхпроводников / Н.В. Трактирникова [и др.] // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Аннотации докладов, т.2, с.73.
2. **Трактирникова Н.В.** Исследование структуры и свойств высокооловянной легированной бронзы, используемой для  $Nb_3Sn$  сверхпроводников с повышенной токонесущей способностью / Н.В. Трактирникова, И.М. Абдюханов, Е.А. Дергунова // Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы ядерной техники» (МАЯТ-2010), Сборник трудов.
3. **Трактирникова Н.В.** Исследование структуры и механических свойств высокооловянной бронзы, полученной разными методами и используемой в качестве матрицы перспективных  $Nb_3Sn$  сверхпроводников / Н.В. Трактирникова, И.М. Абдюханов, Е.А. Дергунова // Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения»: Сборник трудов, Пицунда, Абхазия, 16-21 мая 2010 г. Издательство МИСиС. 2010.
4. **Трактирникова Н.В.** Исследование высокооловянной бронзы, как перспективного матричного материала  $Nb_3Sn$  сверхпроводников с высокой токонесущей способностью/ Н.В. Трактирникова [и др.] // 1-я Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости НКПС-2011, сборник трудов.
5. **Трактирникова Н.В.** Исследование структуры и свойств высокооловянной легированной бронзы, используемой для  $Nb_3Sn$  сверхпроводников с повышенной токонесущей способностью / Н.В. Трактирникова, И.М. Абдюханов, Е.А. Дергунова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Металловедение и новые материалы. – 2012 - № 2 (73). С. 60-70.
6. **Abdyukhanov, I. M.** Production of  $Nb_3Sn$  Bronze Route Strands With High Critical Current and Their Study / I. M. Abdyukhanov, A. E. Vorobyeva, **N. V. Tractirnikova** [и др.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2012. – Vol. 22, No. 3. – Art. no. 6000404. – DOI: 10.1109/TASC.2012.2187320.
7. Способ изготовления композиционного сверхпроводящего провода на основе соединения  $Nb_3Sn$  и технологическая линия для изготовления композиционного сверхпроводящего провода на основе соединения  $Nb_3Sn$ : пат. 2559803 Рос. Федерация: H01B 12/00 (2006.01) / А. К. Шиков, А. Е. Воробьева, И. М. Абдюханов, Д. К. Фигуровский, Е. А. Дергунова, Е. В. Никуленков, М. Н. Насибулин, Н. В. Трактирникова; заявитель и патентообладатель Госкорпорация «Росатом», АО «ВНИИНМ». – 2013151230/07, заявл. 18.11.2013, 10.08.2015 Бюл. № 22. – 14 с.
8. **Коновалова Н. В.** Исследование микроструктуры и механических свойств бронзы с повышенным до 16 мас. % содержанием Sn, используемой для  $Nb_3Sn$  сверхпроводников / Н.В.

Коновалова, И.М. Абдюханов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – №3(99) – С. 15–25. – ISSN 3034-4670

9. Abdyukhanov, I. M. Study of the superconducting layer microstructure and (Nb,Ti,Ta)<sub>3</sub>Sn bronze strands properties / I. M. Abdyukhanov, **N. V. Konovalova** [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1293. – Art. 012040. – DOI: 10.1088/1742-6596/1293/1/012040.

10. Лукьянов, П. А. Реализация программ по исследованию сверхпроводящих материалов в лаборатории высоких магнитных полей в Гренобле [Текст] / П. А. Лукьянов, И. М. Абдюханов, Н.В. Коновалова [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – № 4 (100). – С. 160–171.

11. Лукьянов, П. А. Реализация программ по исследованию сверхпроводящих материалов в лаборатории высоких магнитных полей в Гренобле [Текст] / П. А. Лукьянов, И. М. Абдюханов, **Н.В. Коновалова** [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – № 4 (100). – С. 160–171.

12. Tsapleva, A. S. The effect of joint titanium and tantalum doping on the structure and properties of Nb<sub>3</sub>Sn-based superconducting strands / A. S. Tsapleva, I. M. Abdyukhanov, **N. V. Konovalova** [и др.] // Physics of Metals and Metallography. – 2022. – Vol. 123, No. 8. – P. 775–783. – DOI:10.1134/S0031918X22080142

13. **Коновалова, Н. В.** Структура и свойства Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников для работы в переменных магнитных полях / Н. В. Коновалова, И. М. Абдюханов, Е. А. Дергунова [и др.] // Новые материалы: перспективные технологии: сб. тр. 19-й Междунар. школы-конф. (г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2021). – М., 2021

14. **Коновалова, Н. В.** Исследование влияния легирования и содержания олова в бронзовой матрице на микроструктуру сверхпроводящего слоя и электрофизические свойства Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников/ **Н.В. Коновалова**, И.М. Абдюханов, Дергунова Е.А. // «Материалы ядерной техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2025. – № 4 (130). – С. 33–42.