

На правах рукописи

Валова-Захаревская Евгения Григорьевна

**СТРУКТУРА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ И ТОКОНЕСУЩАЯ  
СПОСОБНОСТЬ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ Nb<sub>3</sub>Sn,  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО БРОНЗОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ И  
МЕТОДОМ ВНУТРЕННЕГО ИСТОЧНИКА ОЛОВА**

Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2024

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

**Научный руководитель:** **Попова Елена Нахимовна**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории прецизионных сплавов и интерметаллидов ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), г. Екатеринбург.

**Официальные оппоненты:** **Овчинников Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории пучковых воздействий, ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), г. Екатеринбург.

**Пугачева Наталия Борисовна**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «18» октября 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.133.01 на базе ФГБУН Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН по адресу: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте [www.imp.uran.ru](http://www.imp.uran.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования.**

Современные научные задачи порождают ряд требований к материалам, используемым для создания научных установок. В новейших ускорителях частиц для физики высоких энергий, в токамаках для физики плазмы, в установках ядерного магнитного резонанса для молекулярной биологии используются сильные магнитные поля. Эти поля генерируются с помощью соленоидов на основе сверхпроводящих проводов. Материалы для таких установок должны обладать высокими и стабильными характеристиками, технологичностью производства и быть коммерчески привлекательными.

В уникальном проекте Интернационального термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) в катушках тороидального поля и центрального соленоида используются многоволоконные проводники на основе  $Nb_3Sn$ , в том числе изготовленные в России. Для реакторов термоядерного синтеза нового поколения требуется создание сверхпроводников с увеличенной токонесущей способностью для получения полей 16 Тл. В проекте модернизации Большого адронного коллайдера с целью увеличения светимости и в масштабном проекте создания Кольцевого коллайдера будущего также запланировано использовать сверхпроводящие соленоиды на основе  $Nb_3Sn$ .

Основной сложностью изготовления сверхпроводников на основе  $Nb_3Sn$  для этих проектов является достижение повышенной критической плотности тока при высоком уровне стабильности. При любом способе изготовления сверхпроводников на основе  $Nb_3Sn$  исследователи стремятся получить максимально высокие характеристики, определяющиеся, прежде всего, структурой сверхпроводящих слоёв, в которых границы зёрен служат основными центрами пиннинга магнитного потока. Именно поэтому для повышения критической плотности тока необходимо увеличивать площадь границ зёрен, т.е. измельчать зерно в сверхпроводящих слоях. Кроме того, токонесущая способность многоволоконных проводников определяется количеством сверхпроводящей фазы, то есть глубиной проработки исходных ниобиевых волокон, а также её качеством, то есть близостью состава фазы  $Nb_3Sn$  к стехиометрии, и внутренней структурой сверхпроводящих слоёв (морфологией, средним размером зерна, равномерностью распределения зёрен по размерам).

Для обеспечения оптимального комплекса свойств и достижения максимально возможной токонесущей способности требуется усовершенствовать конструкцию композиционных проводников, подбирать варианты легирования и оптимизировать режимы диффузионных отжигов.

Таким образом, существует потребность разработки научной основы для дальнейшего усовершенствования структуры и свойств сверхпроводящих композитов на основе  $Nb_3Sn$ .

**Цель работы** — определить влияние легирования и режимов отжига на структуру сверхпроводящих слоёв в композитах разной конструкции и построить модель, связывающую объёмную долю зёрен равноосной морфологии и статистическое распределение зёрен по размерам с максимально достижимой силой пиннинга в композитах на основе Nb<sub>3</sub>Sn.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Определить объёмную долю равноосной сверхпроводящей фазы, средний размер и статистическое распределение зёрен Nb<sub>3</sub>Sn по размерам в композитах разной конструкции в зависимости от легирования и режима отжига.

2. Установить кинетику формирования сверхпроводящих слоёв Nb<sub>3</sub>Sn при реакционной диффузии между ниобиевыми волокнами и бронзовой матрицей в стрендах, изготовленных по «бронзовой» технологии, со спаренными Nb волокнами.

3. Предложить количественный параметр, характеризующий максимальную токонесущую способность сверхпроводящих композитов на основе Nb<sub>3</sub>Sn в сильных магнитных полях и рассчитываемый из объёмной доли равноосных зёрен сверхпроводящей фазы, размеров зёрен и их статистического распределения.

В качестве **объектов** исследования выбраны сверхпроводящие композиты на основе интерметаллида Nb<sub>3</sub>Sn разной конструкции, изготовленные по «бронзовой» технологии и методу внутреннего источника олова.

**Методологические основы исследования.** Исследованные в работе сверхпроводящие композиты на основе Nb<sub>3</sub>Sn, а также их режимы отжигов были разработаны и выполнены в АО «ВНИИНМ им. Ак. Бочвара», там же проведены измерения токовых характеристик — критических токов и критических плотностей тока. Основными методами характеристики структуры выбраны просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия и микрорентгеноспектральный анализ. Статистическая обработка результатов анализа структурных параметров выполнена с применением программы SIAMS-600.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Максимальные значения критического тока достигаются при определенной объёмной доле и размерах равноосных зёрен сверхпроводящей фазы Nb<sub>3</sub>Sn, получаемых в результате оптимальных вариантов диффузионного отжига и легирования.

2. Кинетика формирования сверхпроводящих слоёв в стрендах, изготовленных по «бронзовой» технологии, позволяет получить одинаково эффективную структуру в интервале температур 575–650 °С при длительности диффузионного отжига 10–100 ч.

3. Рассчитываемый из экспоненциальной зависимости силы пиннинга, статистического распределения размеров зёрен равноосной сверхпроводящей фазы и её объёмной доли новый количественный параметр характеризует максимальную токонесущую способность многоволоконных сверхпроводников в сильных магнитных полях.

## **Научная новизна**

Установлена кинетика формирования сверхпроводящих слоёв в промышленных сверхпроводниках для ИТЭР, изготовленных по бронзовой технологии, со спаренными ниобиевыми волокнами. Показано, что в исследованном диапазоне параметров диффузионного отжига температура в большей степени влияет на структуру и скорость формирования сверхпроводящего слоя  $Nb_3Sn$ , чем его длительность.

Обнаружено, что сверхпроводники на основе  $Nb_3Sn$  имеют константу материала  $\delta = 175$  нм, названную характеристической глубиной, на которой происходит экспоненциальное уменьшение плотности силы пиннинга. В поликристаллическом сверхпроводнике это расстояние отсчитывается от межзёренных границ сверхпроводящей фазы.

Впервые предложен количественный параметр, связывающий статистическое распределение зёрен по размерам и объёмную долю равноосной сверхпроводящей фазы  $Nb_3Sn$  в стренде с максимальной токонесущей способностью этого стренда в сильных магнитных полях.

## **Научная и практическая значимость**

Установлено, что сокращение длительности диффузионного отжига промышленных сверхпроводников с 350 до 200 ч обеспечивает увеличение количества равноосной фазы  $Nb_3Sn$  и меньший размер зёрен этой фазы. В дополнение к этому, сокращение длительности отжига экономически выгодно, а также уменьшает риск неконтролируемой диффузии олова через диффузионный барьер в наружную медную оболочку.

Предложенный в диссертации коэффициент эффективности стрендов  $K_{eff}$  позволяет ранжировать сверхпроводники по их качеству, исходя из их структуры, что допускает не проводить измерения критических токов в сильных магнитных полях при низких температурах.

**Достоверность полученных в работе результатов** обеспечивается их устойчивой воспроизводимостью, использованием аттестованных измерительных приборов и экспериментальных установок, аттестованных методик измерений и методов обработки экспериментальных данных, в том числе, в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН г. Екатеринбург (Россия). В данной работе было проведено комплексное исследование сверхпроводящих композитов методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, что позволило получить результаты, согласующиеся с современными научными представлениями.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует пункту 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств

неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» и пункту 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» Паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

**Апробация результатов.** Материалы диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях: Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (2009, 2010, 2011, 2012, 2015, 2016, 2017 гг.); Научно-техническая школа-семинар по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов (Екатеринбург, 2017); Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа (2016, 2017); 6-я школа «Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии» (Екатеринбург, 2013); VIII Сибирский семинар по высокотемпературной сверхпроводимости и смежным проблемам (Красноярск, 2010); XXVI конференция по электронной микроскопии и 4-я Школа молодых ученых «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов» (Зеленоград, 2016); III Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости (Москва, 2015); XXXVII Совещание по физике низких температур (Казань, 2015); XIII Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов (Екатеринбург, 2014); European Conference on Applied Superconductivity (2015, 2017 гг.); 28th International Conference on Low Temperature Physics (Гётеборг, Швеция, 2017); International Conference on Diffusion in Solids and Liquids (Мадрид, Испания, 2013; Париж, Франция, 2014; Амстердам, Нидерланды, 2018); International Conference on Diffusion in Materials (Хайфа, Израиль, 2017).

Исследования были выполнены в рамках государственных заданий по темам «Кристалл» («Структура и свойства поли- и монокристаллических материалов для электроэнергетики: массивные, пленочные и композитные сверхпроводники и конструкционные сплавы на основе никеля, меди и железа», г. р. № 01201463330) и «Давление» («Влияние давления, деформации и термической обработки на структуру, фазовый состав и физико-механические свойства металлов, интерметаллидов, конструкционных и функциональных сплавов и композитов», г. р. №АААА-А18-118020190104-3) при финансовой поддержке Президиума УрО РАН (проекты № 15-17-2-11 «Получение высоких физико-механических свойств в металлах и сплавах для транспорта, энергетики и аэрокосмической техники за счёт структурных и фазовых превращений в результате воздействия большой пластической деформации, высокого давления и

температуры» и № 18-10-2-24 «Формирование в металлических и керамических материалах структурного состояния, обеспечивающего комплекс высоких физико-механических свойств, с использованием пластической деформации в условиях квазистационарного давления») и РФФИ (проект № 16-33-430 «Изучение зависимости скорости роста и морфологии зёрен сверхпроводящего слоя Nb<sub>3</sub>Sn»).

**Личный вклад автора.** Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии под руководством научного руководителя в.н.с. д.т.н. Е.Н. Поповой. Постановка задач исследования проводилась диссертантом совместно с научным руководителем д.т.н., в.н.с. Е.Н. Поповой. Автором лично проведена обработка электронно-микроскопических изображений структуры и расчёт электронограмм всех исследованных материалов; выполнен анализ геометрических параметров сверхпроводящих слоёв Nb<sub>3</sub>Sn и их зёрненной структуры, произведена статистическая обработка полученных результатов.

Нелинейный регрессионный анализ экспериментальных данных зависимости максимальной плотности силы пиннинга от среднего размера зерна Nb<sub>3</sub>Sn в сверхпроводящих композитах проводился диссертантом совместно с к.ф.-м.н., с.н.с. Е.Ф Таланцевым.

Автор участвовала в подготовке образцов для просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии (совместно с д.т.н., в.н.с. Е.Н. Поповой и к.т.н., с.н.с. И.Л. Дерягиной) и в работе на микроскопах (совместно с д.т.н., в.н.с. Е.Н. Поповой, н.с. Н.В. Николаевой, к.т.н., с.н.с. И.Л. Дерягиной и к.х.н., с.н.с. Е.И. Патраковым).

Изготовление композитов и измерение их электрических характеристик проведены в АО «ВНИИНМ им. ак. Бочвара».

Кроме того, автор принимала участие в обсуждении полученных результатов, написании статей и тезисов докладов, выступала на российских и международных конференциях с устными и стендовыми докладами.

**Публикации по результатам работы.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 статьях в рецензируемых журналах, включённых в Перечень ВАК и индексируемых в базах научных публикаций РИНЦ, Web of Science и Scopus [A1 – A14].

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Общий объём работы составляет 135 страниц, в том числе 92 рисунка и 16 таблиц. Список литературы содержит 111 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены выносимые на защиту научные положения, показана научная новизна и практическая значимость результатов исследования, их апробация и степень достоверности, а также указан личный вклад автора.

**В первой главе** приведен обзор литературных источников, посвященных экспериментальному исследованию сверхпроводящих композитов на основе интерметаллида  $Nb_3Sn$ . Особое внимание уделено описанию микроструктуры и кинетики формирования сверхпроводящих слоёв  $Nb_3Sn$ . Сформулирована постановка задачи.

**Во второй главе** описаны экспериментальные методы, использованные при проведении исследования, а также приведены характеристики исследованных сверхпроводящих композитов.

**В третьей главе** рассмотрена структура сверхпроводящей фазы  $Nb_3Sn$  в композитах разной конструкции в зависимости от легирования и режима отжига.

В работе исследовано влияние режимов диффузионного отжига на морфологию и структуру слоёв  $Nb_3Sn$  в композитах с кольцевыми Nb волокнами (рисунок 1). Это бронзовый метод, а использование трубок ниобия вместо сплошных волокон в конструкции композита позволяет снизить путь диффузии олова, поскольку олово идет с двух сторон — снаружи и изнутри.

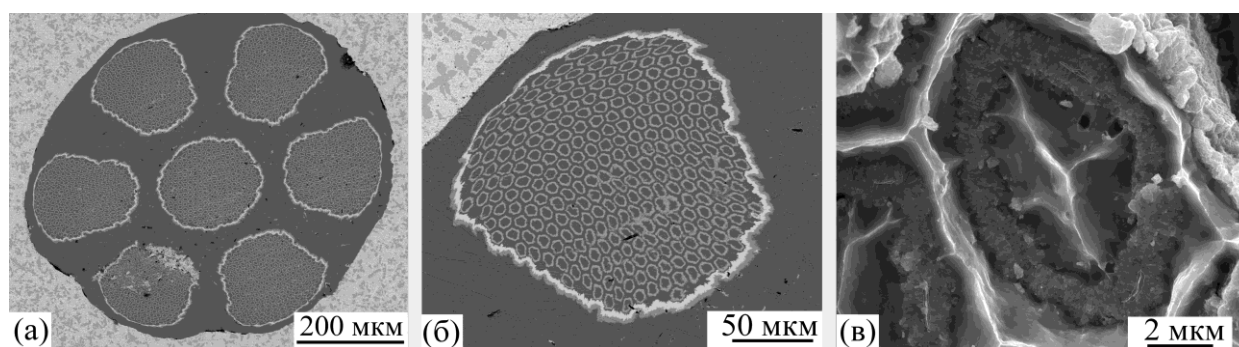


Рисунок 1 — Поперечные сечения композита с кольцевыми волокнами: а — общий вид; б — периферийный стренд; в — кольцевое Nb волокно с зёрнами  $Nb_3Sn$  (излом)

Эти композиты подвергались различным режимам диффузионного отжига, приведенным в таблице 1, в зависимости от которых определялись параметры структуры сверхпроводящих слоёв. Наиболее совершенной структурой сверхпроводящих слоёв обладают образцы К-1 и К-8, и именно они демонстрируют самые высокие значения критического тока (рисунок 2а, таблица 1). Применение двухступенчатого отжига к композитам этого дизайна привело к заметному увеличению среднего размера зерен и понижению критического тока (рисунок 2б, таблица 1). Также было установлено, что режим с



повышенной длительностью и температурой отжига приводит к аномальному росту зёрен и значительному снижению критического тока (рисунок 2в, таблица 1).

Таблица 1 — Режимы диффузионного отжига, параметры распределения зёрен Nb<sub>3</sub>Sn по размерам и критические токи I<sub>c</sub> (12 Тл, 4.2К) композитов с кольцевыми волокнами

Шифр	Режим отжига	D <sub>min</sub> –D <sub>max</sub> , нм	D <sub>ср</sub> , нм	СКО, нм	I <sub>c</sub> , А
К1	575 °С, 300 ч	20–120	55	15	101
К2	625 °С, 150 ч	25–220	67	21	95.5
К3	625 °С, 300 ч	20–150	61	19	98
К4	675 °С, 50 ч	25–320	92	26	78
К5	675 °С, 100 ч	25–450	95	32	75
К6	575 °С, 150 ч + 650 °С, 200 ч	25–230	80	23	92
К7	575 °С, 150 ч + 625 °С, 100 ч	25–250	59	19	99
К8	575 °С, 100 ч + 625 °С, 50 ч	20–220	55	17	101

D<sub>min</sub> и D<sub>max</sub> — минимальный и максимальный диаметр равноосных зёрен Nb<sub>3</sub>Sn; D<sub>ср</sub> — средний размер зёрен Nb<sub>3</sub>Sn, СКО — среднее квадратичное отклонение распределения; I<sub>c</sub> (12 Тл, 4.2К) — критический ток.

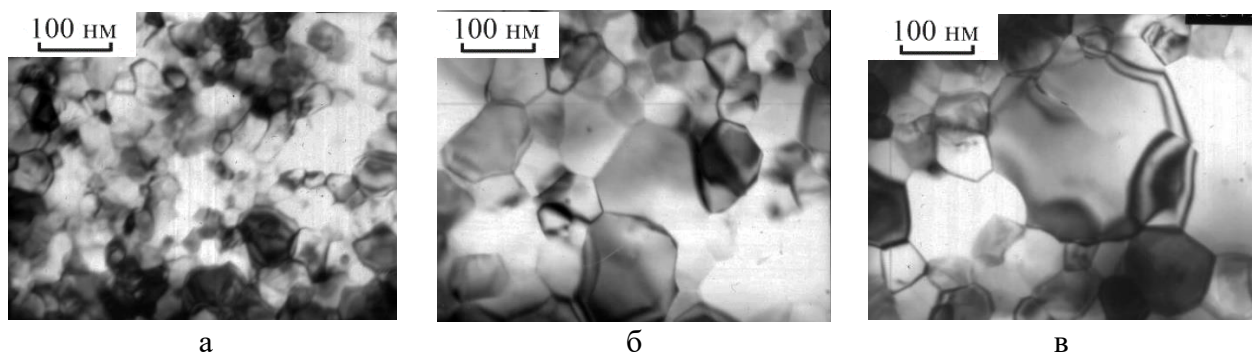


Рисунок 1 — Структура слоя Nb<sub>3</sub>Sn в образцах К1, отжиг 575 °С/300 ч (а); К6, отжиг 575 °С/150 ч + 650 °С/200 ч (б) и К5, отжиг 675 °С/100 ч (в)

Проведенный анализ позволил установить корреляцию между критическим током и средним размером зёрен фазы Nb<sub>3</sub>Sn (таблица 1, рисунок 3). В свою очередь, на микроструктуру диффузионных слоёв температура отжига влияет в большей степени, чем продолжительность.

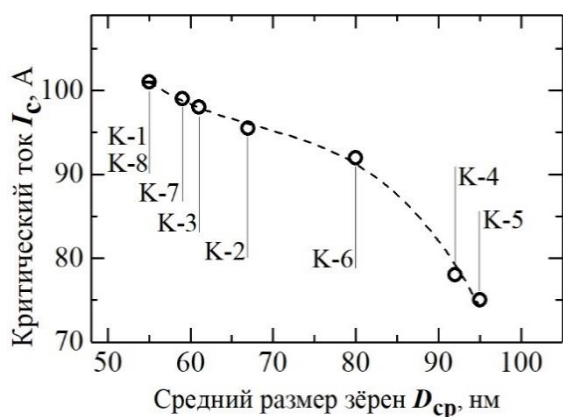


Рисунок 3 — Зависимость критического тока проводников с кольцевыми волокнами от среднего размера зёрен Nb<sub>3</sub>Sn после разных режимов диффузионного отжига

На композитах с распределёнными источниками олова (их называют ВИП-композиты, сокр. от внутреннего источника питания) установлена корреляция между структурными характеристиками сверхпроводящей фазы и получаемой критической плотностью тока. Результаты расчёта параметров структуры сверхпроводящих слоёв приведены в таблице 2, а на рисунке 4 показаны примеры изломов таких композитов.

Установлено, что максимальное значение критической плотности тока достигается в проводниках с наименьшей долей столбчатых зёрен и с самыми мелкими равноосными зёрнами  $Nb_3Sn$  с наименьшим СКО. Оптимальная структура слоёв получена в проводниках с легированной марганцем матрицей, что обеспечило самые высокие значения критической плотности тока.

Таблица 2 — Параметры структуры слоёв  $Nb_3Sn$  в композитах с распределёнными источниками олова

Образец	$J_c$ , А/мм <sup>2</sup>	Доля равноосных зёрен, %	$D_{ср}$ , нм	$D_{мин}-D_{макс}$ , нм	СКО, нм
ВИП1	2270	96	94	25–280	35
ВИП2	2280	98	96	25–260	30
ВИП3	2023	94	95	25–290	34
ВИП3*	1215	95	108	25–320	38
ВИП3**	—	95	130	30–400	43
ВИП4	850	86	120	30–330	39

ВИП3\* отжигали по режиму с повышенной температурой последней ступени, у ВИП3\*\* добавлена 4-я высокотемпературная ступень 700 °С, 50 ч

$J_c$  — критическая плотность тока;  $D_{ср}$  — средний размер зёрен  $Nb_3Sn$ ;  $D_{мин}$  и  $D_{макс}$  — минимальный и максимальный диаметр равноосных зёрен  $Nb_3Sn$ ; СКО — среднее квадратичное отклонение распределения.

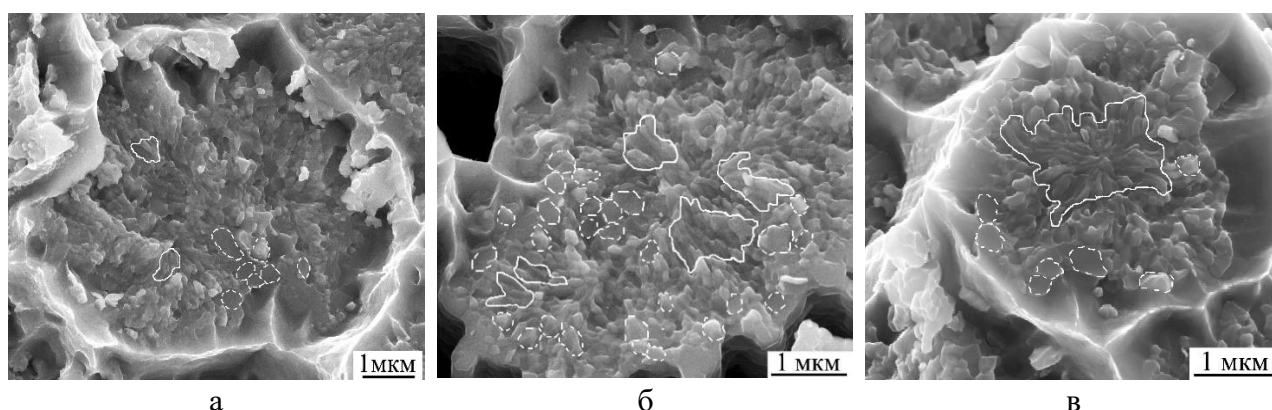


Рисунок 2 — Изломы отдельных волокон в образцах ВИП2 (а), ВИП3 (б) и ВИП4 (в). Сплошными линиями обведены зоны столбчатых зёрен; пунктиром показаны крупные равноосные зёрна

Влияние легирования титаном на рост и структуру сверхпроводящих слоёв изучали на бронзовых композитах со спаренными ниобиевыми волокнами. Также изучался вопрос о возможности уменьшения общего времени диффузионного отжига как на первой, так и на второй ступени.

На рисунках 5 и 6 показаны примеры структуры слоя в двух композитах (с легированием волокон и легированной матрицей, соответственно) после разных режимов отжига. На рисунках 5в и 6в показана структура слоёв после стандартного двухступенчатого отжига, а на рисунках 5а,б и 6а,б — после первой и второй ступени укороченного диффузионного отжига.

Были построены гистограммы распределения зёрен по размеру в исследованных образцах после первой ступени отжига, и результаты этих исследований обобщены и приведены в таблице 3.

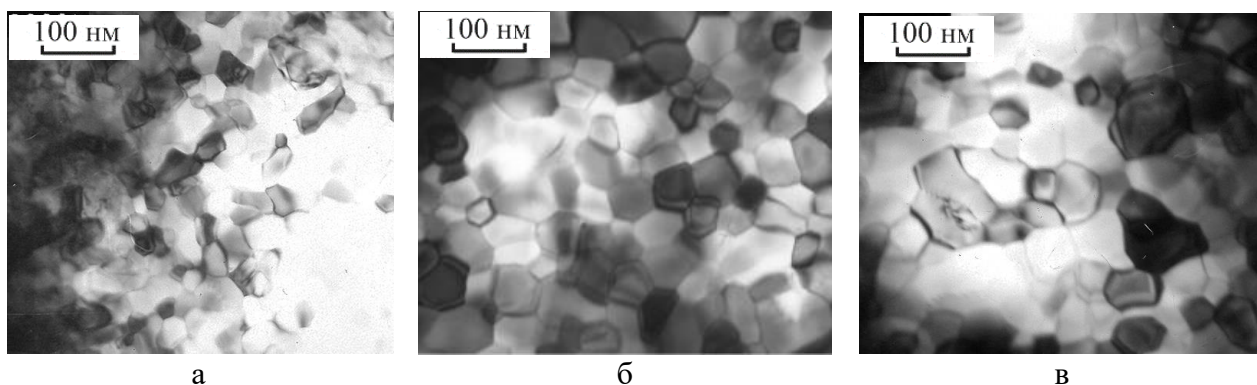


Рисунок 5 — Структура сверхпроводящих слоёв  $Nb_3Sn$  в образце БР6 ( $Nb-1.55Ti/Cu-Sn$ ): а — после первой ступени отжига  $575\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ ч}$ ; б — после отжига  $575\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ ч} + 650\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ ч}$ ; в — после отжига  $575\text{ }^\circ\text{C}/150\text{ ч} + 650\text{ }^\circ\text{C}/200\text{ ч}$

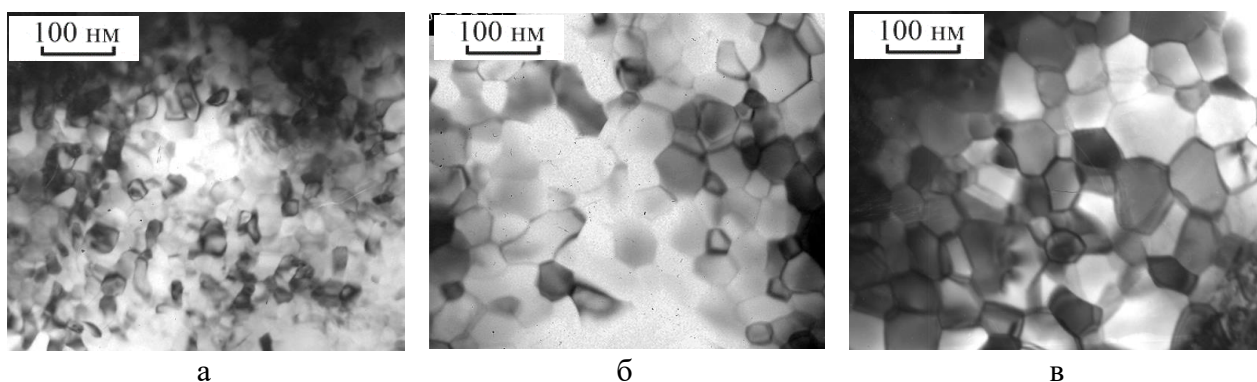


Рисунок 6 — Структура сверхпроводящих слоёв  $Nb_3Sn$  в образце БР8 ( $Nb/Cu-Sn-0.24Ti$ ): а — после первой ступени отжига  $575\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ ч}$ ; б — после отжига  $575\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ ч} + 650\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ ч}$ ; в — после отжига  $575\text{ }^\circ\text{C}/150\text{ ч} + 650\text{ }^\circ\text{C}/200\text{ ч}$

Таблица 3 — Параметры распределения зёрен Nb<sub>3</sub>Sn по размерам в композитах после первой ступени отжига 575 °C/100 ч

№ п/п	Ti, мас. %	D <sub>мин</sub> –D <sub>макс</sub> , нм	D <sub>ср</sub> , нм	СКО, нм
БР1	–	15–72	37	8.5
БР2	1.11 в Nb	15–90	45	10.0
БР4	1.33 в Nb	20–100	45	11.2
БР5	1.51 в Nb	20–110	47	13.0
БР7	1.75 в Nb	20–150	50	13.9
БР8	0.24 в бронзе	15–100	38	9.1

D — размер зёрен, СКО — среднее квадратичное отклонение распределения.

Как видно в таблице 3, наименьшие значения получены для нелегированного образца и композита с легированной бронзовой матрицей. Легирование титаном волокон приводит как к возрастанию среднего размера зерен сверхпроводящей фазы, так и к большему разбросу зерен по размеру.

Полученные после обработки снимков данные по распределению зёрен сверхпроводящей фазы Nb<sub>3</sub>Sn по размерам после разных режимов диффузионного отжига обобщены и представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Параметры распределения зёрен Nb<sub>3</sub>Sn по размерам в композитах после первой ступени (575 °C/100 ч), после укороченного двухступенчатого диффузионного отжига (575 °C/100 ч + 650 °C/100 ч) и после стандартного отжига (575 °C/150 ч + 650 °C/200 ч)

№ обр.	Ti, мас. %	Термообработка					
		575 °C/100 ч		575 °C/100 ч + 650 °C/100 ч		575 °C/150 ч + 650 °C/200 ч	
		D <sub>ср</sub> , нм	СКО, нм	D <sub>ср</sub> , нм	СКО, нм	D <sub>ср</sub> , нм	СКО, нм
БР1	–	37	9	68	19	–	–
БР3	1.20 в Nb	42	12	69	19	–	–
БР6	1.55 в Nb	48	12	72	20	79	26
БР8	0.24 в бр.	38	9	66	18	67	21

D<sub>ср</sub> — средний размер зёрен, СКО — среднее квадратичное отклонение распределения.

После двухступенчатого отжига размеры зерен в диффузионных слоях становятся приблизительно в 1.5–2 раза больше, увеличивается также и разброс зерен по размерам. Сокращение времени двухступенчатого отжига приводит к немного меньшему среднему размеру зёрен. Скорость роста диффузионных слоёв Nb<sub>3</sub>Sn зависит от способа легирования композита и концентрации титана. Эти различия наиболее заметны уже после первой ступени диффузионного отжига (таблица 5). Максимальная ширина слоёв Nb<sub>3</sub>Sn после первой ступени отжига наблюдается в композите с легированной матрицей (0.24 мас. %) и в композитах с концентрацией титана 1.55–1.75 мас. % при легировании волокон. При этом с ростом

концентрации титана в ниобиевых волокнах увеличивается не только общая ширина слоев сверхпроводящей фазы, но и доля столбчатых зерен в слое, что нежелательно.

Таблица 5 — Характеристики структуры композитов после первой ступени диффузионного отжига, 575 °С/100 ч (содержание титана указано в исходном состоянии, до отжига)

Обр.	Ti, мас. %	L, нм	L <sub>р</sub> , нм	L <sub>ст</sub> , нм
БР1	–	400–700	400–600	50–150
БР3	1.20 в Nb	500–1000	300–400	150–250
БР6	1.55 в Nb	600–1000	300–400	300–500
БР7	1.75 в Nb	600–1200	300–400	300–600
БР8	0.24 в бр.	500–1000	400–800	50–150

L — ширина слоя Nb<sub>3</sub>Sn; L<sub>р</sub> — ширина зоны равноосных зёрен Nb<sub>3</sub>Sn, L<sub>ст</sub> — ширина зоны столбчатых зёрен.

Применение сокращенного двухступенчатого отжига приводит к достаточно полной проработке ниобиевых волокон, особенно в проводнике с 1.55 мас. % титана в ниобиевых волокнах (таблица 6). При стандартном, более длительном диффузионном отжиге достигается незначительно более глубокая проработка ниобиевых волокон, однако увеличивается доля столбчатых зёрен.

Таблица 6 — Характеристики структуры композитов после укороченного двухступенчатого диффузионного отжига (содержание титана указано в исходном состоянии, до отжига)

№	Ti, мас.%	L, нм	L <sub>р</sub> , нм	L <sub>ст</sub> , нм
БР1	–	900 – 1400	300 – 400	400 – 900
БР3	1.20 в Nb	900 – 1400	300 – 500	400 – 800
БР6	1.55 в Nb	1200 – 1500	500 – 700	500 – 700
БР8	0.24 в бр.	900 – 1400	600 – 800	100 – 300

L — ширина слоя Nb<sub>3</sub>Sn; L<sub>р</sub> — ширина зоны равноосных зёрен Nb<sub>3</sub>Sn, L<sub>ст</sub> — ширина зоны столбчатых зёрен.

Результаты, представленные в третьей главе, опубликованы в работах [А2, А3, А7-А14].

**В четвертой главе** рассмотрены кинетика формирования сверхпроводящих слоёв Nb<sub>3</sub>Sn и токонесущая способность композитов. Для определения кинетики формирования сверхпроводящих слоёв Nb<sub>3</sub>Sn в промышленных композитах для ИТЭР, изготовленных по бронзовой технологии, со спаренными ниобиевыми волокнами, был выбран соответствующий композит, к которому применялись отжиги с различной температурой и длительностью.

На рисунке 7 показана структура слоёв Nb<sub>3</sub>Sn после 10-часового отжига при разных температурах, а на рисунке 8 — после отжига при 650 °С с разной длительностью. Очевидно, что и температура, и время диффузионного отжига существенно влияют на зёрненую

структуру диффузионных слоёв, причем роль температуры в исследованном диапазоне значительно больше.

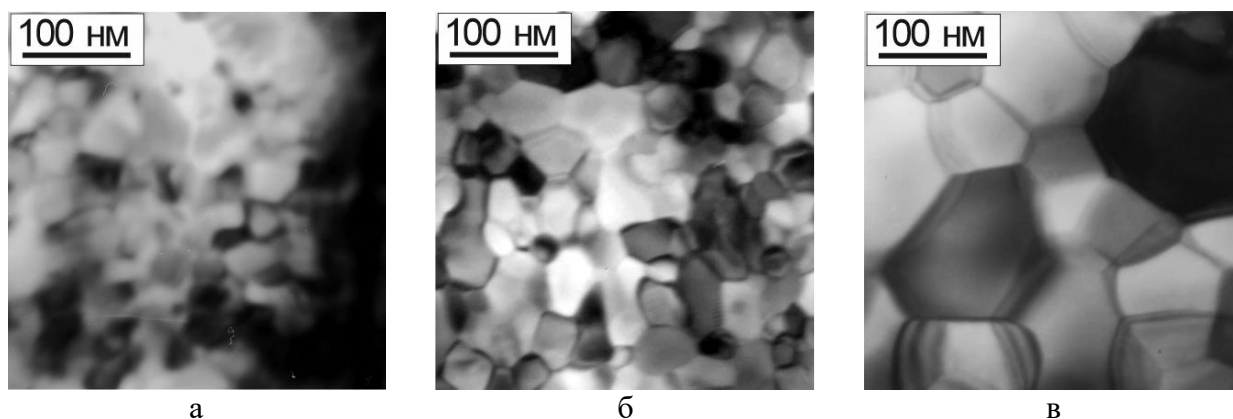


Рисунок 7 — Структура слоя  $Nb_3Sn$  после 10-часового отжига при разных температурах: а — 575 °С (БР6-2), б — 650 °С (БР6-5), в — 750 °С (БР6-8)

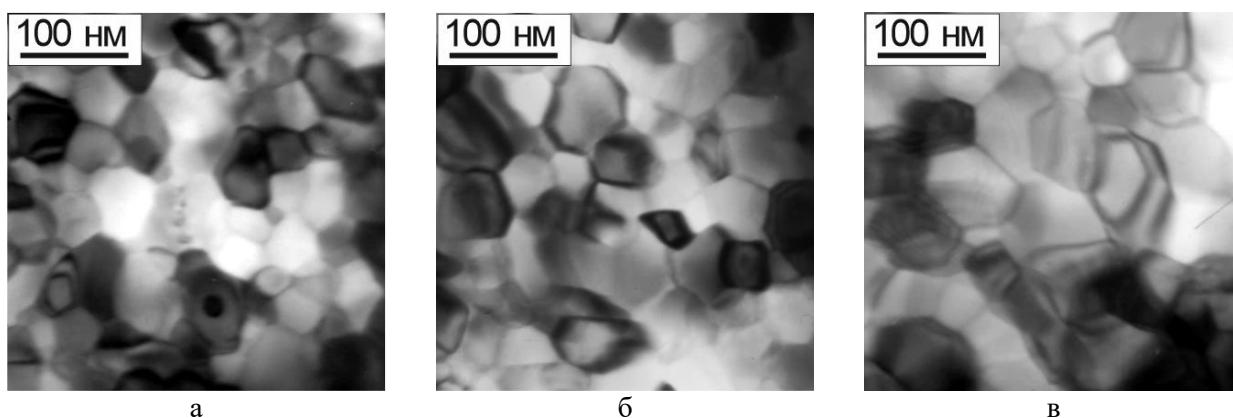


Рисунок 8 — Структура сверхпроводящего слоя в образцах с разным временем отжига при 650 °С: а — 10 ч (БР6-5), б — 50 ч (БР6-6), в — 100 ч (БР6-7)

Результаты анализа размеров зёрен сверхпроводящего слоя получали по данным просвечивающей и сканирующей микроскопии. В первом случае исследовали изображения продольных фольг композитов. Во втором случае использовались изображения изломов композитов в поперечных сечениях. Значения среднего размера равноосных зёрен (с СКО этого значения), полученные при обработке изображений, представлены на рисунке 9.

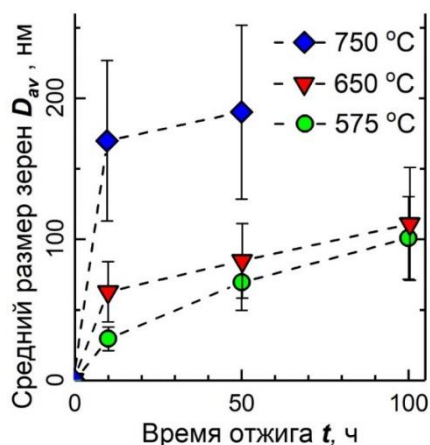


Рисунок 9 — Средний размер зёрен  $Nb_3Sn$  в зависимости от времени отжига при разных температурах (по данным СЭМ). Вертикальные планки — СКО распределения

Как видно из представленных данных, при 750 °С даже при кратковременном отжиге в течение 10 ч средний размер равноосных зёрен значительно превышает таковой после длительного низкотемпературного отжига. Напомним, что для получения высоких токонесущих характеристик в сильных магнитных полях важны не только размеры зёрен сверхпроводящей фазы и разброс по размерам, от которых зависит количество и равномерность распределения центров пиннинга, но и концентрация атомов Sn в сверхпроводящей фазе. В крупных зёрнах содержание Sn ближе к стехиометрическому, а наименьшее количество Sn наблюдается в столбчатых зёрнах. Поэтому нужен разумный баланс между хорошей стехиометрией и достаточно мелкими размерами равноосных зёрен.

На рисунках 10 и 11 видно, что при 750 °С рост сверхпроводящего слоя происходит намного быстрее. После короткого отжига (10 ч) в образце БР6-5 (650 °С) формируются несколько более толстые слои, чем в образце БР6-2 (575 °С), но при этом в образце БР6-8 (750 °С) достигается практически полное превращение ниобия в Nb<sub>3</sub>Sn в большинстве волокон (таблица 7). При более низких температурах, даже после 100 часов отжига, не достигается полная проработка Nb волокон, и в них присутствует остаточный ниобий, хотя при 650 °С волокон с остаточным ниобием не так много.

Таблица 7 — Средняя толщина слоёв Nb<sub>3</sub>Sn, нм

Температура, °С	Время отжига, ч					
	10		50		100	
575	БР6-2	330	БР6-3	520	БР6-4	750
650	БР6-5	470	БР6-6	590	БР6-7	910
750	БР6-8	850	БР6-9	950		

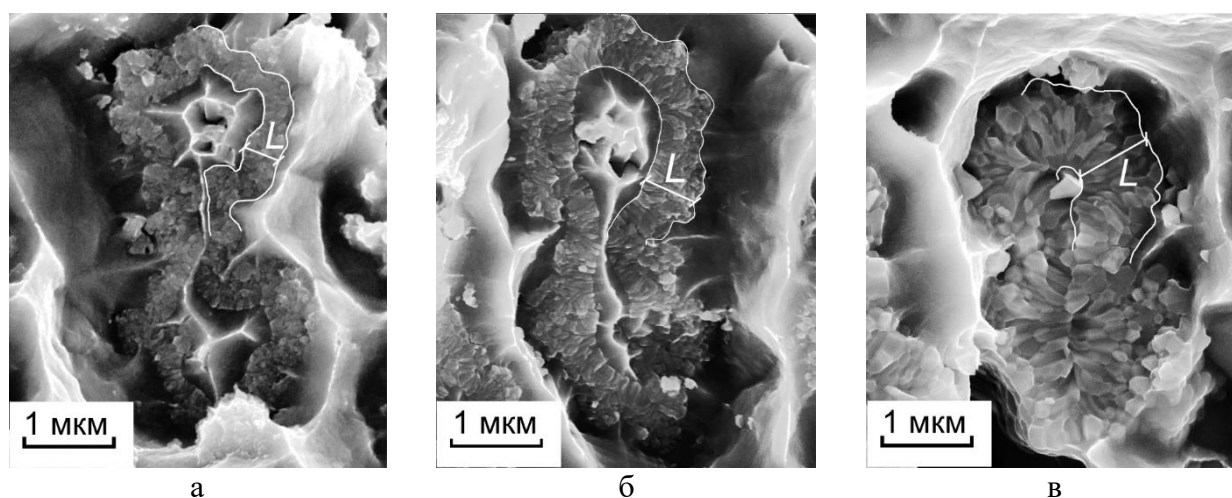


Рисунок 10 — СЭМ изображения изломов Nb волокон со слоями Nb<sub>3</sub>Sn после отжига 10 ч при разной температуре: а — 575 °С (БР6-2), б — 650 °С (БР6-5), в — при 750 °С (БР6-8)

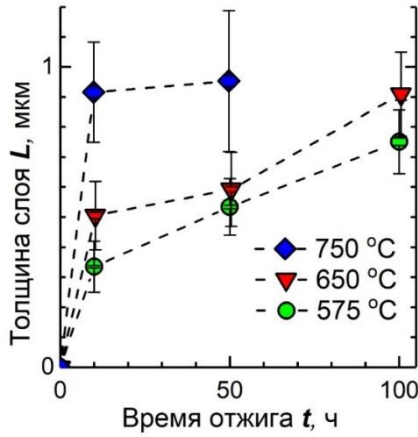


Рисунок 11— Средняя толщина сверхпроводящего слоя Nb<sub>3</sub>Sn в зависимости от времени и температуры отжига, планками отмечены СКО.

СКО данных, полученных в настоящей работе, очень широкое, поэтому очень сложно найти точный показатель роста толщины сверхпроводящего слоя. Тем не менее, очень грубая оценка показывает, что рост толщины слоя при 575 °C наиболее полно соответствует параболическому закону ( $m = 0.45$ ). При более высоких температурах (650 °C и 750 °C) наблюдается значительное отклонение от этого закона ( $m = 0.35$  и  $0.23$  соответственно).

Для построения модели взаимосвязи структуры сверхпроводящих композитов с силой пиннинга были проанализированы имеющиеся в литературе данные. Традиционный подход к представлению зависимости максимальной плотности силы пиннинга ( $F_{p,max}$ ) от размера зерна Nb<sub>3</sub>Sn ( $d$ ) заключается в использовании обратного полулогарифмического графика и описанию указанной зависимости с помощью логарифмической функции, представленной ниже:

$$F_{p,max}(d) = A \times \ln(1/d) + B, \quad (1)$$

где свободные параметры  $A = 22.7$  и  $B = -10$ .

Однако, с этой моделью связаны как минимум три фундаментальные проблемы:

- Логарифмическая функция может работать только с безразмерной переменной, тогда как переменная в этом уравнении имеет размерность, обратную длине.
- Две другие проблемы связаны с пределами уравнения для больших и малых размеров зерна, некорректных с физической точки зрения:

$$|F_{p,max}(d)|_{d \geq D=650 \text{ nm}} = |(A \times \ln(1/d) + B)|_{d \geq D=650 \text{ nm}} \leq 0, \quad (2)$$

$$\lim_{d \rightarrow 0} |F_{p,max}(d)| = \lim_{d \rightarrow 0} (A \times \ln(1/d) + B) = \infty. \quad (3)$$

В экспериментах со многими функциями, для описания зависимости плотности силы пиннинга от размера зерна  $F_{p,max}(d)$ , найдено простое и физически обоснованное выражение:



$$|F_{p,max}(d)| = |F_{p,max}(0)| \times e^{-\frac{d}{\delta}}, \quad (4)$$

где  $|F_{p,max}(0)|$  и  $\delta$  — свободные параметры. Эта экспоненциальная функция демонстрирует физически обоснованные пределы:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} |F_{p,max}(d)| = \lim_{d \rightarrow \infty} \left( |F_{p,max}(0)| \times e^{-\frac{d}{\delta}} \right) = 0, \quad (5)$$

$$\lim_{d \rightarrow 0} |F_{p,max}(d)| = \lim_{d \rightarrow 0} \left( |F_{p,max}(0)| \times e^{-\frac{d}{\delta}} \right) = |F_{p,max}(0)| < \infty. \quad (6)$$

В работе показана применимость нового уравнения для имеющихся в литературе наборов данных для сверхпроводников на основе  $Nb_3Sn$ , изготовленных по бронзовой технологии (рисунок 12) и методу «порошок в трубе» (рисунок 13).

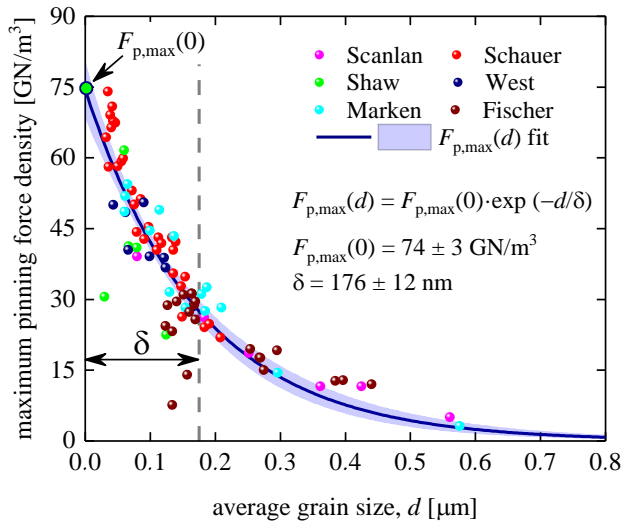


Рисунок 12 — Максимальная плотность силы пиннинга  $|F_{p,max}(d)|$  в зависимости от среднего размера зёрен  $d$  для проводников  $Nb_3Sn$ , изготовленных по бронзовой технологии, и кривая, соответствующая уравнению (4). Исходные данные взяты из работ Marken<sup>1</sup>, West *et al*<sup>2</sup>, Fischer<sup>3</sup>, Shaw<sup>4</sup>, Schauer *et al*<sup>5</sup>, и Scanlan *et al*<sup>6</sup>. Проводники  $Nb_3Sn$  изготовлены по бронзовой технологии. Полученные параметры  $|F_{p,max}(0)| = 74 \pm 3 \frac{GN}{m^3}$ ,  $\delta = 176 \pm 12$  нм; качество аппроксимации 0.9248. Доверительный интервал 95% отмечен сиреневым цветом

<sup>1</sup> Marken, K. R. Characterization Studies of Bronze-Process Filamentary  $Nb_3Sn$  Composites / K. R. Marken. – PhD Thesis, Wisconsin Univ., Madison, USA, 1986. – Текст : непосредственный.

<sup>2</sup> West, A. W. A transmission electron microscopy investigation of filamentary superconducting composites / A. W. West, R. D. Rawlings – Текст : непосредственный // Journal of Materials Science. – 1977. – Т. 12. – № 9. – С. 1862-1868.

<sup>3</sup> Fischer, C. M. Investigation of the Relationships between Superconducting Properties and  $Nb_3Sn$  Reaction Conditions in Powder-in-Tube  $Nb_3Sn$  Conductors / C. M. Fischer. – Master Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2002. – 110 с. – Текст : непосредственный.

<sup>4</sup> Shaw, B. J. Grain size and film thickness of  $Nb_3Sn$  formed by solid-state diffusion in the range 650–800 °C / B. J. Shaw. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physics. – 1976. – Т. 47. – № 5. – С. 2143-2145.

<sup>5</sup> Schauer, W. Improvement of  $Nb_3Sn$  high field critical current by a two-stage reaction / W. Schauer, W. Schelb. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Magnetics. – 1981. – Т. 17. – № 1. – С. 374-377.

<sup>6</sup> Scanlan, R. M. Flux pinning centers in superconducting  $Nb_3Sn$  / R. M. Scanlan, W. A. Fietz, E. F. Koch. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physics. – 1975. – Т. 46. – № 5. – С. 2244-2249.

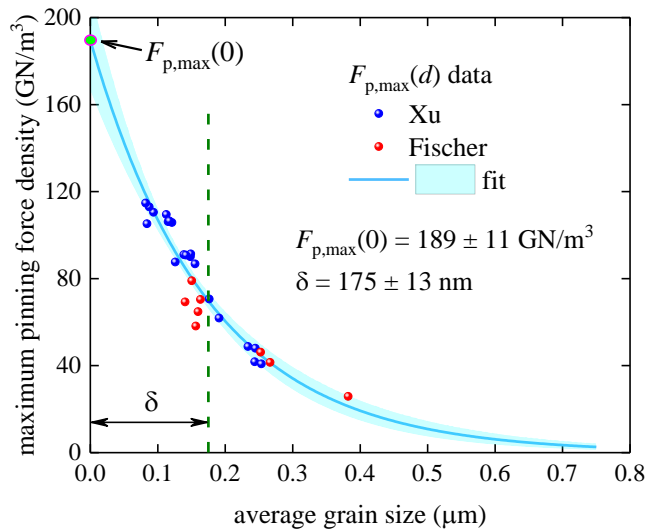


Рисунок 13 — Максимальная плотность силы пиннинга  $|F_{p,max}(d)|$  в зависимости от среднего размера зёрен  $d$  для проводников Nb<sub>3</sub>Sn, изготовленных по методу «порошок в трубе», и кривая, соответствующая уравнению (4) для слоёв Nb<sub>3</sub>Sn в проводниках, изготовленных по методу «порошок в трубе». Исходные данные взяты из работ Fischer<sup>7</sup> и Xu *et al*<sup>8</sup>. Полученные параметры  $|F_{p,max}(0)| = 189 \pm 11 \frac{\text{GN}}{\text{m}^3}$ ,  $\delta = 175 \pm 13 \text{ nm}$ ; качество аппроксимации 0.9093. Доверительный интервал 95% отмечен голубым цветом

Обнаружено, что параметр  $\delta$  одинаков для разных технологий изготовления, следовательно, он является константой материала Nb<sub>3</sub>Sn. По сути, он является расстоянием, на котором происходит экспоненциальное уменьшение плотности силы пиннинга, поэтому в работе он назван характеристической глубиной.

В результате создания модели, финальное уравнение для максимальной плотности силы пиннинга в стренде, полученное в данной диссертации, имеет следующий вид:

$$F_{p,max} = F_{p,max}(0) \times K_{eff}, \quad (7)$$

где

$$K_{eff} = \frac{G \times S_{filament,eq}}{S_{wire}} \times \frac{\sum_{i=1}^N e^{-\frac{d_i}{\delta}} \times \left( \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi d_{ij}^2}{4} \right)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi d_{ij}^2}{4}} \quad (8)$$

является коэффициентом эффективности стренда. Этот коэффициент, в свою очередь, раскладывается на два множителя:

$$K_{eff} = k_{s,eq} \times K_{eff,Nb_3Sn}, \quad (9)$$

где

$$k_{s,eq} = \frac{G \times S_{filament,eq}}{S_{wire}} = \frac{S_{wire,eq}}{S_{wire}} \quad (10)$$

<sup>7</sup> Fischer, C. M. Investigation of the Relationships between Superconducting Properties and Nb<sub>3</sub>Sn Reaction Conditions in Powder-in-Tube Nb<sub>3</sub>Sn Conductors / C. M. Fischer. – Master Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2002. – 110 с. – Текст : непосредственный.

<sup>8</sup> Xu, X. Internally oxidized Nb<sub>3</sub>Sn strands with fine grain size and high critical current density / X. Xu, M. D. Sumpston, X. Peng – Текст : непосредственный // Advanced Materials. – 2015. – Т. 27. – № 8. – С. 1346-1350.

является коэффициентом удельной доли равноосной фазы в стренде, этот коэффициент зависит от конструкции композита, а

$$K_{\text{eff},\text{Nb}_3\text{Sn}} = \frac{\sum_{i=1}^N e^{-\frac{d_i}{\delta}} \times \left( \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi d_{ij}^2}{4} \right)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi d_{ij}^2}{4}} \quad (11)$$

является коэффициентом эффективности равноосной фазы  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , который зависит от доли в равноосной фазе  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  зёрен разного размера.

В данной модели  $|F_{p,\text{max}}(0)|$  является максимально достижимым значением плотности силы пиннинга для данного сверхпроводящего материала при размере зёрен, стремящемся к 0. На коэффициент эффективности стренда  $K_{\text{eff}}$  влияет конструкция композита, температура и длительность диффузионного отжига, способ легирования и количество легирующего элемента.

Фундаментальным свойством полученного уравнения является то, что коэффициент эффективности стренда  $K_{\text{eff}}$  рассчитывается исключительно из данных, полученных в ходе микроскопических исследований, а сверхпроводящие свойства описаны множителем–константой. Таким образом, в работе нам удалось связать электронные свойства (в частности, сверхпроводящий пиннинг магнитного потока) со структурой материала.

В работе показано применение этой модели для сравнения структуры после различных режимов диффузионного отжига с помощью коэффициента эффективности стрендов. Для бронзовых композитов со спаренными ниобиевыми волокнами в работе получено уравнение для расчёта коэффициента удельной доли равноосной сверхпроводящей фазы  $k_{S,\text{eq}}$ :

$$k_{S,\text{eq}} = \frac{G \times S_{\text{filament,eq}}}{S_{\text{wire}}} = \frac{G \times f_{\text{eq}} \times 4\sqrt{3} \times (2 \times L_{\text{Nb}_3\text{Sn}} \times L_{\text{filament}} - L_{\text{Nb}_3\text{Sn}}^2)}{S_{\text{wire}}} \quad (12)$$

Величины  $f_{\text{eq}}$ ,  $L_{\text{filament}}$  и  $L_{\text{Nb}_3\text{Sn}}$  определяются из микроскопических исследований, а  $S_{\text{wire}}$  и  $G$  закладываются при изготовлении стренда.

В таблице 8 приведены режимы отжига и рассчитанные коэффициенты для композитов, на которых изучалась кинетика формирования сверхпроводящих слоёв  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ . Как можно видеть в таблице, композиты БР6-3 и БР6-7 имеют одинаковый  $K_{\text{eff}} = 0.095$ , но при этом они имеют абсолютно разную структуру волокон. Волокна композита БР6-3 содержат относительно небольшое количество образовавшейся равноосной фазы, но её зёрна имеют малые диаметры. А волокна композита БР6-7 практически не содержат остаточный ниобий, в этом стренде образуется максимальное количество равноосной сверхпроводящей фазы, но диаметры зёрен при этой термообработке в полтора раза больше (средние размеры зёрен 70 и 111 нм, соответственно). В этом смысле образец БР6-5, имеющий наивысший  $K_{\text{eff}} = 0.096$ ,

характеризуется сбалансированным сочетанием всех структурных параметров. При этом можно заметить, что образцы после диффузионного отжига при температуре 750 °С (композиты БР6-8 и БР6-9) имеют более низкие значения  $K_{\text{eff}}$ . Несмотря на большое количество образовавшейся в этих образцах фазы  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , она содержит не максимальную долю равноосных зёрен, а их диаметры значительно больше. Это приводит к более чем полуторакратному снижению  $K_{\text{eff}}$ .

Таблица 8 — Коэффициенты эффективности слоя  $\text{Nb}_3\text{Sn}$   $K_{\text{eff,Nb}_3\text{Sn}}$ , коэффициенты удельной доли равноосной фазы  $k_{\text{S,eq}}$  и коэффициенты эффективности стренда  $K_{\text{eff}}$  для образцов после различных режимов диффузионного отжига

Образец	$T$ , °С	$t$ , ч	$K_{\text{eff,Nb}_3\text{Sn}}$	$L$ , нм	$f_{\text{eq}}$	$k_{\text{S,eq}}$	$K_{\text{eff}}$
БР6-2	575	10	0.822	330	0.64	0.115	0.094
БР6-3	575	50	0.635	520	0.60	0.149	0.095
БР6-4	575	100	0.516	750	0.56	0.167	0.086
БР6-5	650	10	0.643	470	0.64	0.149	0.096
БР6-6	650	50	0.566	590	0.59	0.158	0.089
БР6-7	650	100	0.460	910	0.66	0.206	0.095
БР6-8	750	10	0.324	850	0.63	0.195	0.063
БР6-9	750	50	0.278	950	0.62	0.194	0.054

$T$  — температура отжига, °С;  $t$  — время отжига, ч;  $K_{\text{eff,Nb}_3\text{Sn}}$  — коэффициент эффективности слоя  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ;  $L$  — толщина слоя  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , нм;  $f_{\text{eq}}$  — доля в слое равноосных зёрен;  $k_{\text{S,eq}}$  — коэффициент удельной доли равноосной фазы  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ;  $K_{\text{eff}}$  — коэффициент эффективности стренда.

На рисунке 14 представлена зависимость коэффициента эффективности стренда от температуры и времени диффузионного отжига в виде диаграммы и в виде графика для разных температур отжига.

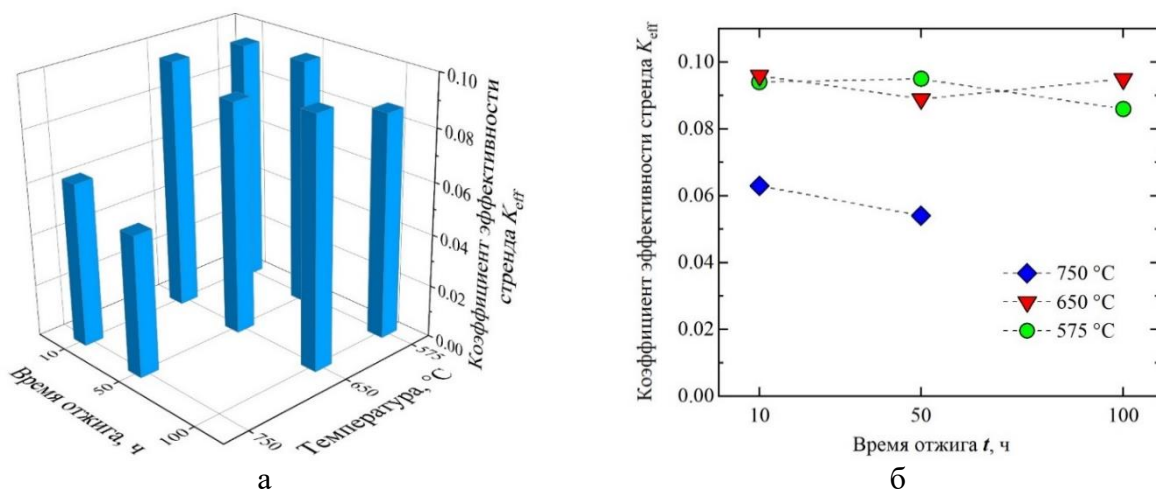


Рисунок 14 — Зависимость коэффициента эффективности стренда  $K_{\text{eff}}$  от температуры и времени диффузионного отжига: а — диаграмма  $K_{\text{eff}}(T, t)$ , б — проекция  $K_{\text{eff}}(t)$  для разных температур отжига

АО «ВНИИНМ им. ак. Бочвара» предоставил для исследований уже оптимизированные сверхпроводники, поэтому различия в  $K_{eff}$  не такие большие, как можно было бы ожидать. Этому способствовала огромная проведенная работа по оптимизации конструкции и режимов легирования. Эти композиты предназначены для проектов мега-саенс, и с инженерной точки зрения очень трудно осуществить равномерные и быстрые нагрев и охлаждение многотонных конструкций сверхпроводящих магнитов. Поскольку синтез сверхпроводящей фазы происходит уже после финальной сборки всего изделия при однократном нагреве, то цена ошибки чрезвычайно высока. В работе показано, что одинаково эффективная структура волокон формируется в интервале температур и длительностей отжига, достаточно широком для практического применения исследованной конструкции композитов в крупномасштабных проектах.

Предложенный в диссертации  $K_{eff}$  является легко рассчитываемым (исключительно из результатов электронно-микроскопических исследований) количественным параметром, характеризующим максимальную токонесущую способность сверхпроводящих проводов в сильных внешних магнитных полях.

Результаты, представленные в четвертой главе, опубликованы в работах [А1, А4–А6].

В **заключении** представлены основные результаты и выводы, полученные в работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Обобщая полученный экспериментальный материал, можно выделить следующие основные результаты:

1. Определена объёмная доля равноосных зёрен сверхпроводящей фазы  $Nb_3Sn$  и построены гистограммы распределения зёрен этой фазы по размерам в композитах разного типа, на основании чего установлены параметры диффузионных отжигов и легирования, обеспечивающие высокую токонесущую способность проводников в сильных магнитных полях (12 Тл, 4.2 К).

2. Установлена кинетика формирования сверхпроводящих слоёв в стрендах, изготовленных по «бронзовой» технологии со спаренными Nb волокнами: при низкой температуре (575 °С) наблюдается параболический закон роста, показывающий, что рост слоя определяется скоростью зернограничной диффузии; при более высоких температурах (650 °С и 750 °С) наблюдается значительное отклонение от этого закона из-за увеличения размера зёрен и обеднения бронзовой матрицы по олову.

3. Предложен новый количественный параметр — коэффициент эффективности стренда  $K_{\text{eff}}$  — для аттестации токонесущей способности многоволоконных коммерческих проводов  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , изготовленных по различным технологиям. Данный параметр рассчитывается из объёмной доли равноосной фазы, размеров зёрен, статистического распределения зёрен по размерам, дизайна стренда и обнаруженной экспоненциальной зависимости плотности силы пиннинга от размера зёрен  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ . Необходимо отметить, что данный параметр потенциально может применяться для аттестации многожильных коммерческих проводов, изготовленных из других сверхпроводников.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

- A1. Characteristic Length for Pinning Force Density in  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  / E.F. Talantsev, E.G. Valova-Zaharevskaya, I.L. Deryagina, E.N. Popova. – Текст: непосредственный // *Materials*. — 2023. — V. 16. — P. 5185—5198.
- A2. Effect of Intermediate Heat Treatment on the Formation and Structure of Superconducting Layers in Multifilamentary  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ -Based Wires / E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // *Defect and Diffusion Forum*. — 2019. — V. 391. — P. 239—245.
- A3. Effect of Sn Concentration in Bronze Matrix on the Pre-Reaction Formation of  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  Layers in Bronze-Processed Superconducting Strands of Different Design / I. Deryagina, E. Popova, E. Patrakov, E. Valova-Zaharevskaya, I. Abdyukhanov, A. Tsapleva, M. Alexeev – Текст: непосредственный // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2018. — V. 28. — P. 8252722–8252726.
- A4. Effect of diffusion annealing regimes on the structure of  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  layers in ITER-type bronze-processed wires / E.G. Valova-Zaharevskaya, E.N. Popova, I.L. Deryagina, I.M. Abdyukhanov, A.S. Tsapleva. – Текст: непосредственный // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — V. 969. — P. 12055–12060.
- A5. Growth Rate and Morphology of  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  Layers in ITER-Type Bronze-Processed Wires Under Different Diffusion Annealing Regimes / E. Valova-Zaharevskaya, E. Popova, I. Deryagina, I. Abdyukhanov, A. Tsapleva, M. Alekseev – Текст: непосредственный // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2018. — V. 28. — P. 6001305–6001309.
- A6. Характеризация структуры сверхпроводящего слоя в процессе его формирования в композитах  $\text{Nb}/\text{Cu}-\text{Sn}$ , изготовленных по бронзовой технологии / Е.Г. Валова-Захаревская, Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, И.М. Абдюханов, М.О. Курилкин, А.С. Цаплева, М.В. Алексеев – Текст: непосредственный // *Ядерная физика и инжиниринг*. — 2017. — V. 8. — P. 56–61.

- A7. Effect of Nb<sub>3</sub>Sn layer structure and morphology on critical current density of multifilamentary superconductors / I.L. Deryagina, E.N. Popova, E.I. Patrakov, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2017. — V. 440. — P. 119–122.
- A8. Structure of superconducting layers in bronze-processed and internal-tin Nb<sub>3</sub>Sn-based wires of various designs / I. Deryagina, E. Popova, E. Patrakov, E. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Journal of Applied Physics. — 2017. — V. 121. — P. 233901–233908.
- A9. Влияние режимов отжига на структуру сверхпроводящих слоев Nb<sub>3</sub>Sn в композитах с внутренними источниками олова / Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, Е.Г. Валова-Захаревская, Е.И. Патраков – Текст: непосредственный // Физика металлов и металловедение. — 2016. — V. 117. — P. 1063–1072.
- A9a. Effect of Annealing Regimes on the Structure of Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting Layers in Composites with Internal Tin Sources / E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.G. Valova-Zakharevskaya, E.I. Patrakov – Текст: непосредственный // Physics of Metals and Metallography. — 2016. — V. 117. — P. 1028–2064.
- A10. Effect of Diffusion Annealing and Design of Internal Tin Wires on the Structure and Morphology of Superconducting Nb<sub>3</sub>Sn Layers / I. Deryagina, E. Popova, E. Patrakov, E. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2016. — V. 26. — P. 6000706–6000711.
- A11. Morphology and Structure of Nb<sub>3</sub>Sn Diffusion Layers in Superconductors with Tubular Nb Filaments / E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.I. Patrakov, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Defect and Diffusion Forum. — 2015. — V. 364. — P. 139–146.
- A12. The Nb<sub>3</sub>Sn layers formation at diffusion annealing of Ti-doped multifilamentary Nb/Cu–Sn composites / E.N. Popova, I.L. Deryagina, E.G. Valova-Zaharevskaya – Текст: непосредственный // Cryogenics. — 2014. — V. 63. — P. 63–68.
- A13. Влияние легирования и режимов диффузионного отжига на формирование нанокристаллических слоев Nb<sub>3</sub>Sn в композитах Nb/Cu–Sn со спаренными Nb волокнами / Е.Н. Попова, И.Л. Дерягина, Е.Г. Захаревская, Е.П. Романов, Е.А. Дергунова, А.Е. Воробьева, С.М. Балаев – Текст: непосредственный // Материаловедение. — 2012. — V. 11. — P. 31–36.
- A14. Влияние способа легирования и геометрии композита на структуру нанокристаллических слоев Nb<sub>3</sub>Sn в сверхпроводящих композитах Nb/Cu–Sn / И.Л. Дерягина, Е.Н. Попова, Е.Г. Захаревская, Е.П. Романов, А.Е. Воробьева, Е.А. Дергунова, С.М. Балаев – Текст: непосредственный // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика». — 2011. — V. 4. — P. 149–161.

---

Отпечатано на ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 зак. №19

Объем 1 печ. л. Формат 60x84 1/16

620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18