



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной работе
НИИЦ «Курчатовский институт»

Э.Ф. Лобанович

2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Алексеева Максима Викторовича на тему
«Структура и технологичность ниобиевых составляющих Nb_3Sn
сверхпроводников», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов»

На сегодняшний день при сооружении магнитных систем термоядерных реакторов, устройств физики высоких энергий, ЯМР-спектрометров и других устройств, в которых создаются магнитные поля с индукцией 10 Тл и выше, в качестве обмоточного материала применяются Nb_3Sn сверхпроводники. Как правило, единичные Nb_3Sn сверхпроводники представляют собой провода диаметром 0,5 – 1,5 мм, длиной от нескольких сотен метров до десятков километров, имеющие сложную композиционную структуру. На технологичность и длину единичных кусков Nb_3Sn сверхпроводников значительное влияние оказывают характеристики используемых при их изготовлении полуфабрикатов. В первую очередь это ниобиевые прутки для формирования волокон и ниобиевые трубы или листы для формирования диффузионного барьера. При массовом производстве Nb_3Sn сверхпроводников в количестве нескольких сотен тонн для таких применений, как магнитная система Интернационального Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР), с целью повышения характеристик сверхпроводников и снижения издержек при их изготовлении возникает большая потребность в оптимизации технологии получения полуфабрикатов. Диссертация Алексеева Максима Викторовича на тему «Структура и технологичность ниобиевых составляющих Nb_3Sn сверхпроводников» является очень **актуальной**,

поскольку в ней изучено изменение структуры и свойств ниобиевых полуфабрикатов в зависимости от различных режимов деформации и термической обработки, которые в основном используются в технологии сверхпроводящих материалов. Знание этих зависимостей позволило разработать и оптимизировать режимы получения полуфабрикатов для Nb_3Sn сверхпроводников с улучшенными характеристиками и сниженной себестоимостью. Также в работе были изучены свойства материалов, которые могут быть использованы для легирования ниобиевых волокон с целью повышения токонесущей способности сверхпроводников.

Научная новизна диссертации состоит в том, что в ней был изучен ниобий с ранее неисследованным уровнем исходной твердости менее 60 НВ высокой степени чистоты. Построена диаграмма рекристаллизации и установлены зависимости механических свойств от степени предварительной деформации, температуры и длительности последующего отжига. Впервые были исследованы закономерности совместной деформации конструктивных элементов из сплава Ti-Sn в составе композита Cu/Nb/Ti-Sn в зависимости от исходной структуры, температуры отжига и степени деформации.

Значимость для науки и производства заключается в том, что были разработаны технологические режимы изготовления ниобиевых полуфабрикатов с требуемыми характеристиками для Nb_3Sn сверхпроводников, получаемых из крупных составных заготовок. С использованием оптимизированных технологических режимов получения ниобиевых прутков в производственных условиях АО ЧМЗ выпущены 500 промышленных партий Nb_3Sn сверхпроводящих стрендов диаметром 0,82 мм и общей массой около 66 тонн для проекта ИТЭР с требуемыми электрофизическими характеристиками. Были разработаны и опробованы в промышленных условиях схемы получения ниобиевых прутков с уменьшенной по сравнению со штатной схемой себестоимостью и с их использованием успешно изготовлены две промышленные партии Nb_3Sn стрендов для проекта ИТЭР с требуемыми электрофизическими характеристиками.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, включая 2 статьи в рецензируемых научных изданиях ВАК, 1 патент РФ на полезную модель, 1 патент РФ на изобретение, 1 публикацию в сборнике трудов международной конференции и 3 публикации в сборниках трудов российских конференций.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 65 наименований; изложена на 141 странице машинописного текста, включающего 59 рисунков, 20 таблиц и 1 приложение.

Во введении автор обосновывает актуальность темы, формулирует цели и задачи исследования, определяет научную новизну и практическую значимость работы, перечисляет положения, выносимые на защиту.

В первой главе (обзор литературы) хорошо обобщены основные характеристики технических Nb_3Sn сверхпроводников и их применение. Достаточно полно рассмотрены основные методы изготовления Nb_3Sn сверхпроводников. Подробно описаны характеристики металлического ниобия. Рассмотрены способы искусственного легирования ниобиевых волокон в Nb_3Sn сверхпроводниках. Показано, что на момент начала работы в литературе не было полных данных по структуре и свойствам ниобиевых полуфабрикатов высокой степени чистоты с уровнем исходной твердости менее 60 НВ.

Во второй главе подробно описаны характеристики оборудования и исходных материалов, использованных для получения образцов. Представлены методы исследований образцов ниобия и сплава титан-олово.

В третьей главе представляет практический интерес изучение изменения твердости и зеренной структуры образцов ниобия, имеющих различную степень деформации прокаткой, после термообработок в широком интервале температур. Впервые построена диаграмма рекристаллизации ниобия высокой степени чистоты с исходной твердостью менее 60 НВ. На основе анализа построенной в работе диаграммы рекристаллизации ниобия высокой степени чистоты рекомендовано проводить рекристаллизационный отжиг ниобия после деформаций прокаткой в интервале $\varepsilon=2\div 4$, применяемых в технологических

схемах получения полуфабрикатов ниобиевых диффузионных барьеров, при температуре 1000 – 1100 °С с выдержкой в течение не менее 1 часа.

В четвертой главе представляет большой практический интерес изучение влияния различных режимов деформации и термообработки на структуру и свойства ниобиевых прутков, полученных в экспериментальных условиях, для последующего изготовления с их использованием Nb₃Sn сверхпроводников с высокой плотностью тока. Разработаны режимы изготовления ниобиевых прутков Ø7,4 мм с поверхностью 9-10 класса чистоты, средним размером зерна 20±4 мкм, относительным удлинением более 42 % и значением параметра RRR = 106. С целью равномерного прогрева крупных заготовок ниобиевых прутков рекомендовано проводить вакуумный рекристаллизационный отжиг ниобиевых прутков со временем выдержки 2 – 3 ч, что является очень актуальным результатом применительно к промышленному производству.

Пятая глава обладает большой практической значимостью, поскольку в ней разработаны режимы деформации и термообработки ниобиевых прутков в промышленных условиях, исследованы их структура и свойства, изготовлены с их использованием промышленные партии Nb₃Sn сверхпроводников, выбраны оптимальные режимы изготовления ниобиевых прутков. С использованием ниобиевых прутков, полученных по четырем различным технологическим схемам на АО ЧМЗ, были изготовлены промышленные партии Nb₃Sn сверхпроводников и измерены их критические характеристики. Показано, что все полученные сверхпроводники имеют высокие значения критического тока (216 – 232 А) и параметра n (36 – 38), что заметно превышает требуемый уровень свойств для ИТЭР ($I_k \geq 190$ А; $n \geq 20$).

Шестая глава представляет научный интерес с точки зрения дальнейшего повышения токонесущей способности Nb₃Sn сверхпроводников, поскольку в ней исследованы прочностные характеристики сплавов Ti-Sn с различным содержанием олова и подобраны режимы их термообработки с целью оценки их возможного применения для искусственного легирования Nb₃Sn сверхпроводников, которое реализуется путем помещения вставок из данных сплавов в ниобиевые прутки. Впервые исследована микроструктура и

механические свойства композитов Cu/Nb/Ti и Cu/Nb/TiSn в зависимости от температуры отжига и степени деформации для выбора оптимального режима разупрочняющего отжига сплава Ti-Sn с целью его дальнейшего применения в составе Nb₃Sn сверхпроводников. Рекомендовано проводить разупрочняющий отжиг сплава Ti-4,4масс.%Sn в диапазоне температур 550 - 750 °С.

В завершение представлено заключение по работе, список использованных источников и приложение с актом промышленного внедрения результатов работы на АО ЧМЗ.

Диссертация и автореферат написаны грамотным языком в хорошем научном стиле.

Результаты диссертационной работы могут представлять интерес для научно-исследовательских, производственных организаций и ряда технических вузов. В первую очередь материалы диссертации Алексеева М.В. могут быть полезны научным и производственным предприятиям, занимающимся исследованиями, разработкой и производством технических сверхпроводников различного типа, в которых применяются элементы из ниобия, например, АО ЧМЗ (г. Глазов), имеющее действующий цех по производству сверхпроводников. Результаты и выводы диссертации могут быть полезны для научных и производственных предприятий, занимающихся вопросами термообработки и деформации тугоплавких металлов.

По содержанию диссертационной работы можно сделать следующие небольшие **замечания**:

- в Главе 1 «Литературный обзор» целесообразно было бы добавить, что задачи, решаемые в работе с режимами деформации и термообработки ниобиевых полуфабрикатов, помимо Nb₃Sn сверхпроводников, актуальны также для сверхпроводников на основе MgB₂, NbTi, пниктидов и др.;
- в Главе 3 не приведено сравнение микроструктуры после рекристаллизации прокатанных с различной степенью образцов ниобия, исследованных в работе, с микроструктурой ниобиевых барьеров, изготовленных в промышленных условиях;

- не доведено до получения готового сверхпроводящего провода применение сплава титана с оловом как материала вставки в ниобиевое волокно.


Высказанные замечания не затрагивают существа работы и не влияют на ее общую высокую оценку.

Основные выводы диссертанта убедительно подтверждены экспериментальными результатами, их достоверность сомнений не вызывает. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная работа соответствует требованиям п.п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор, Алексеев Максим Викторович, достоин присуждения искомой степени по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертация обсуждалась в отделении сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт» 2 ноября 2016 года.

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

 Круглов В.С.

Адрес:

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

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

Телефон: +7 (499) 196-9539

e-mail: nrcki@nrcki.ru

Круглов Виталий Сергеевич