

Первый заместитель  
директора Центра по науке

«25» март 2021



на диссертацию Карасёва Юрия Владимировича  
«Разработка конструкции и технологии изготовления NbTi сверхпроводников с  
низкими потерями для быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов  
ускорительной техники», представленную на соискание учёной степени  
кандидата технических наук по специальности 05.16.01  
«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Диссертация Карасёва Ю.В. изложена на 196 страницах. Она состоит из введения и обзора литературных источников (глава 1). Используемые материалы и методики описаны в главе 2. В главе 3 обсуждаются результаты исследований заготовок для производства Nb-Ti сверхпроводников. В главе 4 описана разработка технологии сверхпроводящих проводов, отвечающих требованиям магнитных систем ФАИР с быстроциклирующими полями. Приведен список цитируемой литературы из 66 наименований и три приложения, подтверждающие промышленное внедрение результатов исследований диссертационной работы.

**Первая глава** работы представляет собой обзор литературы. Кратко изложены основы материаловедения сверхпроводников сплава Nb-Ti. Дается анализ видов возникающих при эксплуатации энергетических потерь. Рассмотрена общая технологическая схема изготовления Nb-Ti сверхпроводников, и описана конкретная, существующая в России промышленная технология изготовления композиционного Nb-Ti стренда для проекта ИТЭР, принятая в работе за базовую.

Приведены первоначальные технические требования к проводу для быстроциклирующих полей проекта ФАИР, актуальные на момент начала работы над диссертацией. Учитывая проведенный анализ источников энергетических потерь и особенностей технологии, в заключение к первой главе формулируются задачи исследования, поставленные для достижения заявленной цели.

**Во второй главе** перечислены исследованные материалы и описаны способы их получения. Дается описание методик исследования, примененных в данной работе: металлографический анализ, исследование гомогенности, определение твердости и механических свойств, контроль технических характеристик композиционных NbTi проводов (диаметр, шаг и направление скрутки, коэффициент заполнения и отношение объемов медной и не медной составляющих) и определение электрофизических характеристик композиционных Nb-Ti проводов (критический ток, параметр «n», относительное остаточное сопротивление, энергетические потери).

**В третьей главе** показано, что использование метода равноканального углового прессования (РКУП) позволяет добиться однородных равноосных зерен с характерным размером на уровне микрона. Этот результат использован как оценка предельного уровня измельчения зерна. Для реализации этого метода в промышленных условиях требуются финансовые вложения, поэтому для совершенствования структурного состояния прутков с использованием штатного оборудования было предложено: во-первых, введение в штатную технологическую схему операции осадки конического слитка на сферическую шайбу и во-вторых, разработаны технологические схемы получения прутков из цилиндрических слитков с двукратным увеличением диаметра. Автором решена

задача получения более однородной и мелкозернистой структуры как в Nb-Ti прутках, так и в ниобиевом диффузионном барьере. В обеспечение однородного структурного состояния диффузионного барьера разработан многослойный барьер из тонколистового ниобия.

Для уменьшения кооперативных потерь и предотвращения «эффекта близости» предложено использование в межволоконной зоне проводов резистивных сплавов на основе меди. Приводятся исследования резистивного сплава Cu-0,5 Mn, не выпускаемого в промышленных условиях в России.

**В четвертой главе** описан процесс разработки технологии Nb-Ti проводников нового класса и сопряженный с ним путь согласования технических требований, обусловленный поиском компромисса между технологическими возможностями и желаемым комплексом эксплуатационных характеристик.

По сравнению с базовой технологией ИТЭР, в разработанных автором Nb-Ti проводах нового поколения с высокой токонесущей способностью, достигнуто существенное снижение гистерезисных потерь за счет уменьшения диаметра волокна более чем в 2 раза.

Среди важнейших результатов, полученных в диссертационной работе, необходимо отметить следующие:

- Показана принципиальная достижимость однородного измельчения зерна в Nb-Ti заготовках до микронного уровня методом равноканального углового прессования. Это открывает пути дальнейшего совершенствования технологии Nb-Ti сверхпроводников.

- С применением ряда инновационных технических решений применительно к существующему производству низкотемпературных сверхпроводников разработана технология изготовления Nb-Ti сверхпроводников нового класса.

- В промышленных условиях изготовлены партии Nb-Ti сверхпроводников нового класса, отвечающие требованиям магнитных систем ускорительного комплекса ФАИР, работающих в условиях быстроциклирующих полей.

**Научная новизна** заключается в первую очередь в разработанной автором технологии Nb-Ti сверхпроводников с высокой токонесущей способностью и

низкими энергетическими потерями и намеченных путях дальнейшего совершенствования.

**Достоверность** результатов подтверждается успешными испытаниями магнитных систем, изготовленных из выпущенных Nb-Ti проводников. Испытания проводились в ИФВЭ (Протвино, Россия) и GSI (Германия).

Основная **практическая значимость** выполненной работы состоит в разработанных технологиях получения Nb-Ti прутков и ниобиевого диффузионного барьера, которые могут быть использованы при производстве NbTi сверхпроводников любого типа и технологии получения NbTi сверхпроводников, предназначенных для работы в быстроменяющихся магнитных полях. Практическая ценность работы также подтверждена патентом РФ на полезную модель № 149395 «Сверхпроводящий провод с низкими энергетическими потерями».

По содержанию работы можно сделать следующие замечания :

1) Диссертация в целом хорошо оформлена, хотя и не свободна от опечаток. Так, например, в средней части формулы (1.2) на странице 27 описывающей удельное сопротивление  $\rho$  через напряжение  $V$ , ток  $I$  и площадь поперечного сечения  $A$  « $\rho=VA/I=\text{const } l^n$ » для сохранения размерности необходим дополнительный множитель в знаменателе «длина образца», а в последней части уравнения показатель  $n$  должен быть заменен на  $n-1$ .

2) На странице 23 имеется некоторая терминологическая путаница: критический ток определяют по вольт-амперной характеристике (ВАХ), измеряемой экспериментально (а не по токонесущей способности). В то время как предлагаемый автором длинный термин «критическая плотность тока, отражающая способность композиционного провода пропускать ток» и есть по сути токонесущая способность, определяемая не только совокупностью критических токов отдельных Nb-Ti волокон, но и, например, конструкцией композита, стабилизирующей матрицей и т.д., и является более общим понятием, чем ВАХ.

3) Представление диссертационной работы существенно выиграло бы, если бы автор представил подробное сравнение сверхпроводников, полученных по базовой технологии ИТЭР, или других, наиболее близких к проекту ФАИР сверхпроводников, со сверхпроводниками, полученными по предлагаемым в работе технологическим схемам. В частности представляет интерес, насколько увеличилась цена продукции при столь впечатляющих улучшениях эксплуатационных характеристик.

4) Наконец, при обсуждении работы возникло замечание, носящее характер пожелания: для дальнейшего развития работы стоит сопоставить результаты исследования токонесущей способности Nb-Ti сверхпроводников нового класса с микроструктурными исследованиями для выявления особенностей системы центров пиннинга.

Сделанные замечания несколько не снижают значимость практических результатов полученных в работе, свидетельствующих о высокой квалификации автора.

Рассмотренная диссертационная работа Карасёва Ю.В. представляет собой оригинальное научное исследование. Основные результаты достаточно полно отражены в 7 статьях рецензируемых журналов из списка ВАК. Материалы диссертации докладывались на отечественных и международных научных конференциях. Автореферат диссертации корректно отражает содержание работы. Диссертационная работа Карасёва Ю.В. соответствует паспорту специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» и отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в действующей редакции), а ее автор Карасёв Юрий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре «Фундаментальные и прикладные исследования сверхпроводимости» отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт» 29.04.2021г. (Протокол № 157). В

обсуждении приняли участие 35 специалистов по теме защищаемой диссертации, в том числе 10 кандидатов наук и 6 докторов наук.

Отзыв составил

Начальник лаборатории физики низких температур и сверхвысоких магнитных полей отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт», д.ф.-м.н., профессор



Е.П. Красноперов

Начальник отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт», к.т.н.



В.С. Круглов

Секретарь семинара «Фундаментальные и прикладные исследования сверхпроводимости» отдела сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт»



А.Ю. Дегтяренко

Заместитель руководителя Комплекса-Ученый секретарь Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт»



О.И. Тимаева

Главный ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»



И.И. Еремин

Адрес:

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

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

Телефон: +7 (499) 196-95-39

e-mail: nrcki@nrcki.ru