

Отзыв

официального оппонента 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»

Несмотря на достигнутый в последние годы значительный прогресс в создании токонесущих элементов на основе купратных высокотемпературных сверхпроводников, сравнительно недавнее открытие железосодержащих сверхпроводников, перспективных для использования в сильных магнитных полях более 20 Тл, на сегодняшний день ниобий-оловянные сверхпроводники являются наиболее востребованным сверхпроводящим материалом для разнообразных применений.

Провода на основе Nb_3Sn сверхпроводников, как правило, диаметром от 0,5 до 3 мм и длиной до 30 км, в которых в определенной конфигурации распределены Nb_3Sn волокна в количестве до нескольких десятков тысяч, используют в обмотках магнитных систем термоядерных реакторов, ускорителей частиц, ЯМР-спектрометров и других устройств. Одним из основных элементов конструкции таких сверхпроводников являются ниобиевые волокна, которые в процессе заключительного диффузионного отжига трансформируются в сверхпроводящие Nb_3Sn волокна и ниобиевые диффузионные барьеры, предназначенные для предотвращения диффузии олова из бронзовой матрицы в медную стабилизирующую оболочку.

При производстве длинномерных Nb_3Sn сверхпроводников одной из важнейших задач является обеспечение однородности критических характеристик по длине провода. Также, в случае изготовления данных сверхпроводников в промышленных масштабах для таких проектов как термоядерный реактор ИТЭР, модернизированный большой адронный коллайдер, циркулярный коллайдер будущего помимо достижения требуемой токонесущей способности важной задачей является снижение себестоимости сверхпроводников. Решение данных задач возможно за счет совершенствования технологии изготовления ниобиевых полуфабрикатов (прутки, листы, трубы). Перечисленные обстоятельства определяют актуальность диссертации М. В. Алексеева, посвященной исследованию влияния различных режимов и видов деформации на структуру и свойства ниобиевых полуфабрикатов, получению ниобиевых прутков в

промышленных условиях, изучению свойств сплавов для искусственного легирования ниобиевых волокон.

В главе 1 проведен литературный обзор, посвященный применению Nb_3Sn сверхпроводников, методам их получения, характеристикам ниобия, искусственному легированию данных сверхпроводников.

В главе 2 описаны исследованные материалы, методы исследования и использованное в работе оборудование.

Глава 3 посвящена изучению влияния степени деформации прокаткой и температуры последующего рекристаллизационного отжига на свойства и структуру ниобия, применяемого для изготовления диффузионных барьеров в Nb_3Sn сверхпроводниках. Данные исследования на примере ниобия высокой степени чистоты ($\text{O} \leq 0,01$; $\text{N} \leq 0,01$; $\text{C} \leq 0,01$; $\text{H} \leq 0,001$ масс.%) с исходной твердостью менее 60 НВ, показали, что его полное разупрочнение после деформации прокаткой с различной степенью истинной деформации $\varepsilon = 0,81 \div 4,70$ происходит после отжига при температуре 1000 °С. При этом обнаружено получение полностью рекристаллизованной структуры и твердости на уровне 50-70 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 главе 4 разработаны и изучены различные режимы изготовления ниобиевых прутков с высоким комплексом свойств. Разработаны режимы изготовления ниобиевых прутков $\varnothing 7,4$ мм с поверхностью 9-10 класса чистоты, средним размером зерна 20 ± 4 мкм, относительным удлинением более 42 % и значением параметра $\text{RRR} = 106$. Установлено, что при выборе режима рекристаллизационного отжига ниобиевых прутков круглого сечения диаметром 4 – 10 мм и шестигранного сечения размером под ключ $S = 4 - 8$ мм, предназначенных для формирования сверхпроводящих волокон, в промышленных условиях большими партиями в крупных садках, возможно варьировать время выдержки в широком интервале от 30 мин до 4 ч. С целью равномерного прогрева крупных садок ниобиевых прутков рекомендовано проводить вакуумный рекристаллизационный отжиг ниобиевых прутков со временем выдержки 2 – 3 ч.

В главе 5 проведены исследования характеристик и структуры ниобиевых прутков, изготовленных в промышленных условиях. С их использованием изготовлены промышленные партии Nb_3Sn сверхпроводников для ИТЭР и

измерены их электрофизические характеристики. При разработке режимов изготовления ниобиевых прутков применительно к промышленным условиям установлено, что, начиная с температуры 900 °С, рекристаллизация в ниобиевых прутках, полученных по четырем различным технологическим схемам из слитков ниобия высокой степени чистоты с твердостью < 50 НВ, протекает практически полностью. Это сопровождается разупрочнением при данной температуре ниобиевых прутков до значений твердости менее 60 НВ. 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; $n \geq 20$).

Глава 6 посвящена изучению характеристик сплава Ti-Sn с точки зрения возможности его использования в качестве материала вставки в ниобиевое волокно. Показано, что композиты Cu/Nb/Ti; Cu/Nb/(Ti–1,82 масс. %Sn); Cu/Nb/(Ti–4,4 масс. %Sn) и Cu/Nb/(Ti–8,18 масс. %Sn) обладают хорошей способностью к деформации с величинами, близкими к тем, которые используются при изготовлении Nb₃Sn сверхпроводников, в которых сплав Ti-Sn может быть использован в качестве материала вставок 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.

Работа выстроена грамотно и целенаправленно, хорошо иллюстрирована данными микроструктурного анализа, эксперименты проведены, как в лабораторных, так и в производственных условиях. На основе полученных результатов выданы рекомендации для разработки технологических режимов изготовления ниобиевых полуфабрикатов с требуемыми характеристиками для Nb₃Sn сверхпроводников. Научные положения, выводы и рекомендации, приведенные в диссертации, являются полностью обоснованными.

Диссертационная работа обладает необходимой новизной, в ней изучены свойства ниобия с ранее неисследованным уровнем исходной твердости менее 60 НВ высокой степени чистоты. Построена диаграмма рекристаллизации ниобия с такими свойствами и установлены зависимости его механических свойств от степени предварительной деформации,

температуры и длительности последующего отжига. Впервые 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.

Использование современных методов исследований, сопоставление результатов с имеющимися литературными данными подтверждает достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации.

Диссертация имеет высокую практическую значимость, поскольку с использованием оптимизированных в диссертационной работе 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. Также разработанные в работе схемы получения ниобиевых прутков с уменьшенной по сравнению со штатной схемой себестоимостью были опробованы в промышленных условиях, 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.

По работе есть несколько замечаний:

1. Главу 3 хорошо бы дополнили снимки поперечного сечения готового Nb_3Sn сверхпроводника, на которых можно было бы оценить форму ниобиевого диффузионного барьера, который был подвергнут перед сборкой рекристаллизационному отжигу по рекомендованному в работе режиму.
2. В главе 4 разработаны режимы получения ниобиевых прутков с высоким качеством поверхности, но отсутствует сравнение геометрии волокон в Nb_3Sn проводе конечного размера в случае использования прутков с высоким и низким качеством поверхности, а также сравнение их электрофизических характеристик.

Данные замечания не снижают общей ценности и качества работы.

По 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, заслуживает присуждения искомой степени по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Ведущий научный сотрудник,
доктор физико-математических наук
лаборатории сверхпроводимости
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физический институт
им.П.Н. Лебедева Российской академии наук



Ельцев Юрий Федорович

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53,
тел.: +7 916 424 75 07
e-mail: eltsev@lebedev.ru

Подпись Ельцева Юрия Федоровича заверяю.

Ученый секретарь
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физический институт им.П.Н. Лебедева
Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук



Колобов А. В.