

## 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»

### Актуальность избранной темы

В настоящее время наиболее промышленно освоенными низкотемпературными сверхпроводниками являются сверхпроводники на основе интерметаллического соединения  $Nb_3Sn$  и сплава  $NbTi$ . Магнитные системы большинства научных мегапроектов, таких как Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор (ИТЭР), Большой Адронный Коллайдер (БАК) и других, изготовлены с применением данных сверхпроводящих материалов, использованное количество которых измеряется сотнями тонн. В магнитных системах, в которых создаются магнитные поля более 10 Тл, могут быть применены только  $Nb_3Sn$  сверхпроводники. В ускорителях частиц и термоядерных реакторах нового поколения, как правило, используются еще более высокие магнитные поля. В связи с этим возрастает требуемое количество  $Nb_3Sn$  сверхпроводников с высокими критическими характеристиками. При промышленном изготовлении  $Nb_3Sn$  сверхпроводников в больших объемах помимо достижения требуемых критических характеристик важными задачами являются, во-первых, обеспечение стабильности характеристик сверхпроводящего провода по длине, которая может достигать 30 км, и, во-вторых, снижение его себестоимости. Данные задачи могут быть решены путем оптимизации технологии изготовления ниобиевых полуфабрикатов для  $Nb_3Sn$  сверхпроводников. Поэтому диссертация Алексеева Максима Викторовича на тему «Структура и технологичность ниобиевых

составляющих Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников», посвященная исследованиям взаимосвязи структуры и свойств ниобиевых полуфабрикатов (прутков, листов) с режимами деформации и термообработок, является **актуальной**. На основе полученных в диссертационной работе результатов сделаны рекомендации для промышленного изготовления ниобиевых полуфабрикатов для Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Главные научные результаты, полученные Алексеевым М.В., можно сформулировать следующим образом:

Исследования ниобия высокой степени чистоты ( $O \leq 0,01$ ;  $N \leq 0,01$ ;  $C \leq 0,01$ ;  $H \leq 0,001$  масс.%) с исходной твердостью менее 60 НВ, предназначенного для формирования диффузионных барьеров, показали, что его полное разупрочнение после деформации прокаткой с различной степенью истинной деформации  $\varepsilon=0,81 \div 4,70$  с получением полностью рекристаллизованной структуры и твердости на уровне 50-70 НВ происходит уже после отжига при температуре 1000 °С.

- На основе анализа построенной в работе диаграммы рекристаллизации ниобия высокой степени чистоты рекомендовано проводить рекристаллизационный отжиг ниобия, деформированного прокаткой со степенью истинной деформации  $\varepsilon=2 \div 4$ , применяемого для получения полуфабрикатов ниобиевых диффузионных барьеров, при температуре 1000 – 1100 °С с выдержкой в течение не менее 1 часа. 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 этой температуре ниобиевых прутков до значений твердости менее 60 HV.

- 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, т.е. 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.
- Разработаны режимы изготовления ниобиевых прутков  $\varnothing 7,4$  мм с поверхностью 9-10 класса чистоты, средним размером зерна  $20 \pm 4$  мкм, относительным удлинением более 42 % и значением параметра  $RRR = 106$ .
- С использованием ниобиевых прутков, полученных по четырем различным технологическим схемам на АО ЧМЗ, были изготовлены промышленные партии  $Nb_3Sn$  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;  $n \geq 20$ ).
- Показано, что композиты Cu/Nb/Ti и Cu/Nb/сплавы системы Ti-Sn, содержащие 1,82, 4,4 и 8,18 масс.%Sn обладают хорошей способностью к деформации с величинами, близкими к тем, которые используются при изготовлении  $Nb_3Sn$  сверхпроводников. Отсюда следует, что сплавы системы Ti-Sn могут быть использованы в качестве материала вставок в ниобиевые прутки.
- Впервые исследована микроструктура и механические свойства композитов Cu/Nb/Ti и Cu/Nb/Ti-Sn в зависимости от температуры

отжига и степени деформации. Это позволило оптимизировать режим разупрочняющего отжига сплава системы Ti-Sn с целью его дальнейшего применения в составе Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников. Рекомендовано проводить разупрочняющий отжиг сплава Ti-4,4масс.%Sn в диапазоне температур 550 - 750 °С.

Работа имеет четкий и направленный характер, в ней удачно сочетаются данные экспериментов, поставленных автором в лаборатории и в промышленных условиях, сопоставление полученных данных с литературными и формулировка конкретных рекомендаций.

**Достоверность** основных положений, результатов и выводов, содержащихся в диссертации, подтверждается использованием современных методов исследования.

Диссертационная работа обладает **научной новизной**: в ней изучены полуфабрикаты ниобия с ранее неисследованным уровнем исходной твердости менее 60 НВ высокой степени чистоты; построена диаграмма рекристаллизации данного ниобия и установлены зависимости механических свойств от степени предварительной деформации, температуры и длительности последующего отжига; впервые исследованы закономерности совместной деформации конструктивных элементов из сплава системы Ti-Sn в составе композита Cu/Nb/Ti-Sn в зависимости от исходной структуры, температуры отжига и степени деформации.

Результаты исследований, полученные в работе, обладают **высокой практической значимостью**. В результате работы сделаны рекомендации по усовершенствованным режимам изготовления полуфабрикатов из ниобия в промышленных условиях. Часть экспериментов проведена на производственном предприятии (АО ЧМЗ). С использованием оптимизированных в работе режимов изготовления ниобиевых прутков изготовлено более половины выпуска Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводников для ИТЭР. Получен акт промышленного внедрения. Представленные автором



результаты и рекомендации могут быть использованы при изготовлении ниобиевых прутков, труб и листов для сверхпроводников на основе различных соединений:  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{NbTi}$ ,  $\text{MgB}_2$  и др.

### Апробация работы

Основные научные результаты диссертационной работы докладывались на 3-х международных и 3-х российских научно-технических конференциях.

Основные результаты исследований **опубликованы** в 8 печатных работах, включая 2 статьи в рецензируемых научных изданиях ВАК, 2 патента РФ, 1 публикацию в сборнике трудов международной конференции и 3 публикации в сборниках трудов российских конференций.

В то же время по содержанию работы имеются следующие замечания:

- в Главе 3 не приведено сравнение микроструктуры и твердости прокатанных образцов из ниобия для диффузионных барьеров со структурой и свойствами других металлов, которые также могут применяться в качестве диффузионных барьеров в  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  сверхпроводниках, например, тантала;
- в работе не проведены механические испытания ниобия при повышенных температурах, что представляет интерес для разработки режимов горячей деформации данного материала.

Высказанные по диссертационной работе замечания не влияют на ее положительную оценку и не опровергают ее основных положений.

Считаю, что 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».

доцент, к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

Тронза Елена Ивановна

Почтовый адрес: 107996, Москва, ул. Стромынка, д.20

Тел.: 8-903-015-77-29

e-mail: elena.tronza@gmail.com

Подпись Тронзы Елены Ивановны заверяю:

*Зав. первого проректора (Телеванов Н.Б.)*

