

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК**

Сборник научных трудов  
X Международной конференция студентов и молодых ученых

РОССИЯ, ТОМСК, 23–26 апреля 2013 г.

## **PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT**

**X INTERNATIONAL CONFERENCE OF STUDENTS AND YOUNG SCIENTISTS**

RUSSIA, TOMSK, April 23–26, 2013

Томск 2013

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ КАБЕЛЕ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Nb-Ti

Ю.А. Мальцев, Г.В. Шляхова

Научный руководитель: д.ф.-м.н. С.А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634021

Томский государственный университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2, 634003

E-mail: [bsa@ispms.tsc.ru](mailto:bsa@ispms.tsc.ru) ; [aspire-life@yandex.ru](mailto:aspire-life@yandex.ru)

## STUDY OF STRUCTURAL ELEMENTS IN SUPERCONDUCTIVE CABLE Nb-Ti

Yu.A. Mal'cev, G.V. Shlyakchova

Scientific Supervisor: Dr. S.A. Baranikova

Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, Tomsk, Akademicheskii Pr., 2/4, 634021,

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050,

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Solyanaya Sq., 2, 634003

E-mail: [bsa@ispms.tsc.ru](mailto:bsa@ispms.tsc.ru); [aspire-life@yandex.ru](mailto:aspire-life@yandex.ru)

*Microstructural evolution in superconductive cable made of Nb+47%Ti alloy and drafted to obtaining intermediate reduction from  $\varnothing 1.3$  to  $\varnothing 1.2$  mm was characterized using atomic force, optical and electron microscopies. This alloy is used for making current-carrying elements for a magnetic system of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). The microstructure and phase composition were examined and the effect they had on the properties of superconductive Nb-Ti alloy subject to drawing and intermediate annealing was assessed. Strain localization zones were revealed in sites where a wire is broken. Changes in chemical composition and shape of Nb-Ti wires in defect-free break zones have been detected. It is found out that a diffusion Nb barrier is formed in the copper binder surrounding the Nb-Ti wire.*

Сплав Nb-Ti в течение последних сорока лет занимает особое положение в технике прикладной сверхпроводимости. Существенная часть научной информации в этой области получена в работах, посвященных исследованию изменений характеристик сверхпроводимости материалов при модификации структурного состояния посредством температурно-силовых воздействий [1-3].

При производстве проводников на основе НТСП наиболее ответственным этапом является волочение, в ходе которого композиционная заготовка деформируется в холодную от  $\varnothing 60 \dots 70$  мм до  $\varnothing 0,1 \dots 1,0$  мм. По этим причинам настоящая работа ориентирована на анализ влияния холодной деформации волочением на структуру многожильного сверхпроводника на основе сплава Nb-Ti.

**Материалы и методика эксперимента.** Структура многожильного сверхпроводника на основе сплава Nb-47,5 мас. % Ti при деформации волочением исследовалась на промежуточной стадии производства сверхпроводящего кабеля при переходе  $\varnothing 1,3 \rightarrow \varnothing 1,2$  мм в поперечном сечении. Для анализа состава и структуры композитного многожильного провода использовались несколько методик, обеспечивающих необходимое пространственное разрешение: оптическая микроскопия (Neophot-21 и Olympus GX 71), растровая электронная микроскопия (Philips SEM 515) и атомно-силовая микроскопия (Solver PH47-PRO) с использованием контактного метода. Сущность метода заключается в том, что колеблющееся острие зонда находится настолько близко к поверхности, что оно слегка «стучит» по

поверхности образца при сканировании, контактируя с поверхностью в нижней части своего размаха. Изгиб кантилевера отражает отталкивающую силу и используется непосредственно, в системе обратной связи для отображения рельефа поверхности.

Металлографические исследования поперечных сечений проводников на оптическом микроскопе показали, что сильнее всего деформированы волокна *Nb-Ti* в промежуточном слое со стороны внешней поверхности, в результате чего волокна имеют «расплющенный» вид. Обнаружена зона локализации пластической деформации в промежуточном слое со стороны внутренней поверхности в виде дефекта в местах обрыва волокон *Nb-Ti* многожильного сверхпроводника (рис. 1).

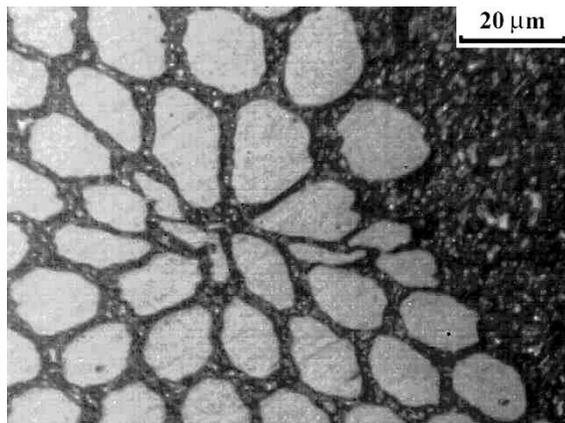


Рис.1. Зона локализации пластической деформации

Для более детального рассмотрения структуры и определения параметров структуры трехслойного триметаллического композита технических многожильных сверхпроводников на основе ниобий-титанового сплава в условиях интенсивных пластических деформаций (размеры зерен и субзерен) был применен метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). Изучали топографию поверхности шлифов в поперечных сечениях контактным методом. Анализ АСМ показал, что в промежуточном слое со стороны внутренней поверхности проводника все волокна *Nb-Ti* имеют округлую форму и их средний диаметр составил  $\sim 10$  мкм (рис. 2 а). Иная картина

наблюдается в промежуточном слое со стороны внешней поверхности проводника. Здесь все волокна вытянутые, «расплющенные» вдоль направления деформации и имеют ромбическую форму с диагоналями  $\sim 13$  и  $11$  мкм соответственно (рис. 2 б).

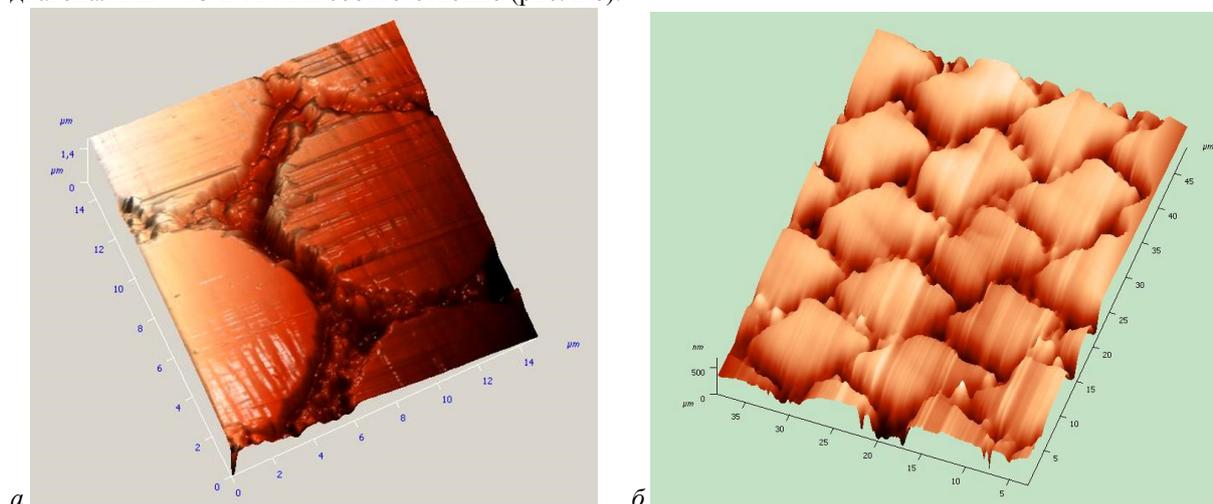


Рис.2 Топография внутренней (а) и внешней (б) поверхностей проводника

В результате интенсивной пластической деформации медь в сердечнике в поперечном сечении проводника приобрела структурную неоднородность, находится в наноструктурном состоянии и представляет собой чередование как отдельно стоящих крупнозернистых и мелкозернистых нанозерен, так и образующих часто целые конгломераты, содержащие до 8 зерен. Все зерна преимущественно округлой или слегка вытянутой формы со средним размером  $800$  нм. Сильнее всего деформирование меди в сердечнике произошло по границе сердечник - промежуточный слой проводника. В этом случае обнаружена неоднородность структуры зерен, и средний размер зерен составил  $\sim 855$  нм. Между

волокнами в матрице медь представлена равноосными зернами преимущественно сферической формы со средним размером 800 нм. Топография поперечного сечения в месте обрыва проводника показала, что в зоне обрыва в области, прилегающей к сердечнику близлежащие волокна Nb-Ti стянулись в одну зону локализации деформации. В месте обрыва проводника в матрице промежуточного слоя между волокнами средний размер зерна меди составил 900 нм.

**Выводы.** Исследования структуры многожильного сверхпроводника на основе сплава Ni-Ti обнаружили: 1) изменения размеров и формы волокон Nb-Ti в промежуточном слое в направлении от внешней (виде ромба) к внутренней стороне (в виде овала) многожильного сверхпроводника; 2) структурную неоднородность зерен Си в матрице и оболочке, а так же неоднородность состава волокон Nb-Ti в промежуточном слое; 3) особенности дефектов промежуточного слоя в местах обрывов многожильного сверхпроводника.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 11-08-00237-а.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlenkova N., Vedernikov G., Shikov A. et al. Study on  $I_c(T, B)$  for the Nb-Ti Strand Intended for ITER PF Insert Coil // IEEE Trans. Appl. Supercond. - 2004. - V. 14. - No. 2. - P. 1028-1030.
2. Lee P.J., Larbalestier D.C. Development of nanometer scale structures in composites of Nb-Ti and their effect on the superconducting critical current density // Acta Metall. - 1987. - V. 35. - No. 10. - P. 2523-2536.
3. Черный О.В., Тихинский Г.Ф., Сторожилов Г.Е. и др. Ниобий-титановые сверхпроводники с высокой токонесящей способностью // Сверхпроводимость: Физика, химия, техника. – 1991. - Т. 4. - № 8. - С.1617-1623.