

PACS: 81.40.Ef, 61.72.Mm

В.А. Белошенко, Н.И. Матросов, В.З. Спусканюк, В.В. Чижко

## ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА NbTi

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина  
E-mail: chishko@ukr.net

*Исследовано влияние комбинированной деформации на механические и функциональные свойства сплава NbTi. Установлено, что комбинированная деформация с применением метода равноканального многоугольного прессования (РКМУП) обеспечивает больший прирост характеристик прочности и пластичности. Плотность критического тока при этом повышается на 60–80%.*

### Введение

Известно, что механические и функциональные свойства сверхпроводников на основе сплава NbTi определяются его структурно-фазовым состоянием, в частности размером зерен (субзерен), объемным содержанием, размером и характером распределения вторичных фазовых выделений. Повышение токонесущей способности сверхпроводника может быть достигнуто применением на стадиях его передела от слитка до провода различных методов воздействия: легирования, холодной деформации, термообработки, облучения и других процессов, а также оптимизацией их режимов. Традиционный способ обработки сплава NbTi основан на создании в нем мелкодисперсных структурных неоднородностей и на том факте, что выделения  $\alpha$ -Ti являются наиболее эффективными центрами пиннинга [1,2]. Поэтому все стадии обработки должны служить цели формирования в конечном продукте однородной наноструктуры с равномерным распределением мелкодисперсных частиц второй фазы.

Холодная деформация считается основным инструментом при получении такой структуры. Однако ее традиционные методы, такие как экструзия, прокатка и волочение, в силу своих технологических особенностей не всегда позволяют накапливать необходимую степень деформации для достижения желаемого результата. В то же время имеются процессы обработки металлов давлением, которые дают возможность реализовать это условие при сохранении первоначальной формы и сечения заготовки [3]. Одним из них является

равноканальное угловое прессование (РКУП). Ему свойственны высокие интенсивности деформации, уровень силового режима и тепловой эффект само-разогрева заготовки. Не менее эффективным в отношении преобразования структуры является разработанный нами метод РКМУП, обладающий рядом технологических преимуществ по сравнению с РКУП [4,5].

В настоящей работе исследована возможность применения РКМУП в сочетании с традиционными методами последующего пластического деформирования и термообработкой для модификации структуры сплава NbTi с целью повышения токонесущей способности получаемых при этом сверхпроводящих изделий.

### Материалы и методы исследований

В качестве исходных заготовок использовали биметаллические прутки диаметром 15 mm сплава ниобий–титан (Nb–60 at.% Ti) в медной (МОб) матрице, изготовленные горячим прессованием при 750°C. Часть заготовок деформировали холодной гидроэкструзией (ГЭ) до диаметра 3.6 mm с единичной степенью деформации  $\varepsilon \leq 1.2$ , а затем волочили с частными деформациями  $\varepsilon \leq 0.2$  для получения сверхпроводящей проволоки диаметром 0.3 mm. Другую часть заготовок подвергали РКМУП с накопленной величиной деформации  $\varepsilon = 9.84$  (12 проходов), после чего деформировали ГЭ и волочением по указанным выше режимам и маршрутам с суммарной величиной монотонной деформации  $\varepsilon = 7.82$ . Величину деформации, накопленную за один проход образца через канал матрицы при РКМУП, определяли по формуле

$$\varepsilon_1 = \frac{2(\text{ctg}\theta_1 + \text{ctg}\theta_2 + \text{ctg}\theta_3)}{\sqrt{3}},$$

где  $\theta$  – половинный угол пересечения сегментов канала с тремя зонами деформации.

Деформирующий блок установки для РКМУП описан в работе [6]. Прессование осуществляли при комнатной температуре по схеме «заготовка за заготовкой» или «фальшзаготовка за заготовкой» со степенью деформации за проход  $\varepsilon_1 = 0.82$ . Давление прессования составляло 600–800 МПа. Для целенаправленного формирования более однородной по объему и равноосной структуры сплава заготовку в каждом последующем цикле прессования переворачивали на 180° вокруг оси поперечного направления и на 90° относительно продольной оси.

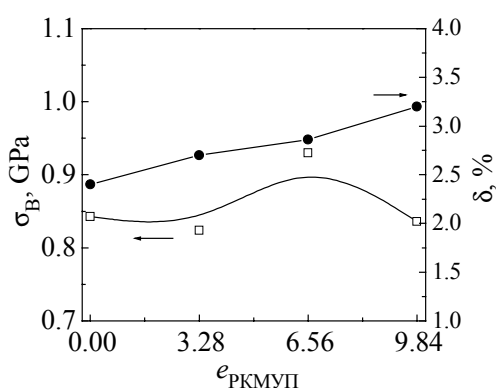
Испытания на растяжение проводили на образцах биметаллической проволоки диаметром 0.3 mm и длиной 180–200 mm. При этом определяли стандартные характеристики: предел прочности  $\sigma_B$  и относительное удлинение  $\delta$ . Относительная ошибка измерений для  $\sigma_B$  и  $\delta$  составляла 2.5%.

Измерения критического тока  $J_c$  осуществляли на образцах в деформированном и отожженном состояниях. Термообработку деформированных образцов проводили в вакууме  $10^{-5}$  mm Hg в интервале температур 300–450°C с выдержкой в течение 1 h. Плотность критического тока проволочных

(длиной до 200 mm и диаметром 0.3 mm) образцов измеряли при температуре 4.2 К в поперечном внешнем магнитном поле до 12 Т.

### Результаты исследований и их обсуждение

Испытания на растяжение проволочных образцов показывают, что при варьировании степени деформации методом РКМУП от нуля до  $\varepsilon = 9.84$



**Рис. 1.** Зависимости продольной прочности  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  проволочных образцов сплава 60Т от величины предварительной деформации РКМУП

значения  $\sigma_B$  и  $\delta$  находятся в пределах 840–930 МПа и 2.4–3.2% соответственно (рис. 1). Таким образом, в результате комбинированной обработки может быть сформировано более прочное и пластичное состояние, чем при монотонной обработке ГЭ и волочением. Наследственность вклада структуры, формируемой при РКМУП, проявляется в повышении до 30% величины относительного удлинения с обеспечением высокой прочности. Это объясняется тем, что знакопеременная деформация методом РКМУП создает предпосылки для интенсивной фрагментации структурных элементов при последующей монотонной деформации.

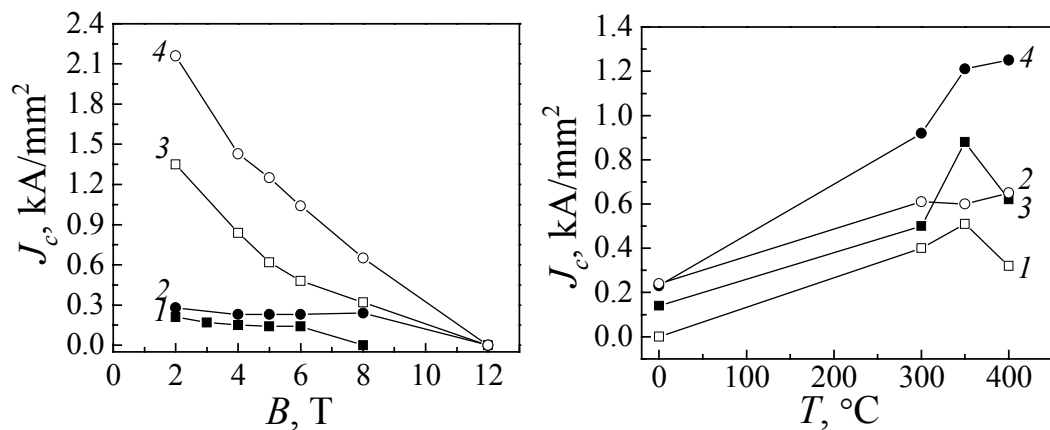
Измерения плотности критического тока, выполненные на проволочных образцах сплава NbTi, показали следующее. Образцы сверхпроводника, полученные по комбинированной технологии с применением РКМУП, имеют более высокие (~ 30% в магнитном поле  $B = 2$  Т и ~ 60% при  $B = 6$  Т) и стабильные токовые характеристики во всем диапазоне магнитных полей по сравнению с проводом, изготовленным без применения РКМУП (рис. 2).

После термообработки плотность критического тока увеличивается во всем интервале магнитных полей (рис. 2, 3). При этом образцы, полученные с применением РКМУП, имеют на 60–80% большую величину  $J_c$ .

Данные результаты свидетельствуют об эффективности преобразования структуры (наноструктурирования) под воздействием РКМУП и объясняются тем, что дополнительное накопление деформации вследствие применения метода РКМУП приводит к формированию более совершенной структуры материала, увеличению содержания выделений  $\alpha$ -фазы с более равномерным распределением этих мелкодисперсных частиц по объему изделий [4,6].

### Выводы

1. Комбинированная деформация с применением РКМУП обеспечивает больший прирост характеристик прочности и пластичности в сравнении с использованием только монотонной или немонотонной деформации.



**Рис. 2.** Зависимости плотности критического тока  $J_c$  проволочных образцов сплава 60Т в деформированном состоянии (1, 2) и после термообработки при 400°С в течение 1 h (3, 4) от величины магнитного поля  $B$ : 1, 3 – ГЭ + волочение; 2, 4 – РКМУП + ГЭ + волочение

**Рис. 3.** Зависимости плотности критического тока  $J_c$  проволочных образцов сплава 60Т от температуры термообработки  $T$ : 1 – ГЭ + волочение при  $B = 8$  Т; 2 – РКМУП + ГЭ + волочение,  $B = 8$  Т; 3 – ГЭ + волочение,  $B = 5$  Т; 4 – РКМУП + ГЭ + волочение,  $B = 5$  Т

2. Комбинированная деформация, включающая РКМУП, позволяет на 60–80% повысить плотность критического тока в сверхпроводящем проводе сплава 60Т.

Авторы выражают благодарность В.П. Дьяконову (Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины), Daniel Gajda (International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures), Andrzej Zaleski (Institute of Low Temperatures and Structural Studies PAN), Roman Puzniak (Institute of Physics PAN) за участие в проведении исследований.

1. P.J. Lee, D.C. Larbalestier, IEEE Trans. Appl. Supercond. **3**, 833 (1993).
2. P.J. Lee, McKinnell, D.C. Larbalestier, Adv. Cryog. Eng. (Materials) **36**, 287 (1990).
3. L. Olejnik, A. Rosochowski, Bull. Pol. Ac.: Tech. **53**, 413 (2005).
4. В.Н. Варюхин, Н.И. Матросов, Е.А. Павловская, Л.Ф. Сенникова, В.З. Спусканюк, Э.А. Медведская, А.Б. Дугадко, Б.А. Шевченко, Металлофиз. новейшие технол. **27**, 905 (2005).
5. О.Б. Дугадко, М.І. Матросов, В.М. Варюхин, В.З. Спусканюк, В.О. Білошенко, Е.О. Медведська, О.А. Давиденко, Б.А. Шевченко, Спосіб рівноканального багатокутного пресування виробів, Україна, № 62615 А, Бюл. № 12 (2003).
6. Н.И. Матросов, В.В. Чишко, В.Ю. Дмитренко, Е.А. Павловская, Л.Ф. Сенникова, В.З. Спусканюк, В.В. Чабаненко, С.В. Васильев, Э.А. Медведская, Б.А. Шевченко, ФТВД **15**, № 1, 95 (2005).

*V.A. Beloshenko, N.I. Matrosov, V.Z. Spuskanyuk, V.V. Chishko*

## INFLUENCE OF COMBINED DEFORMATION ON MECHANICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF NbTi ALLOY

Influence of combined deformation on mechanical and functional properties of NbTi alloy has been investigated. It has been determined that deformation combined with the method of equal-channel multiple-angle pressing (ECMAP) provides a large gain in strength and plasticity characteristics. There is a 60–80% increase in the critical current density.

**Fig. 1.** Dependence of longitudinal strength  $\sigma_B$  and elongation  $\delta$  of 60T alloy wire samples on value of preliminary ECMAP deformation

**Fig. 2.** Dependence of critical current density  $J_c$  on magnetic field value  $B$  for wire samples of 60T alloy in deformed state (1, 2) and after thermal treatment at 400°C for 1 h (3, 4): 1, 3 – HE + drawing; 2, 4 – ECMAP + HE + drawing

**Fig. 3.** Dependence of critical current density  $J_c$  on thermal treatment temperature  $T$  for wire samples of 60T alloy: 1 – HE + drawing for  $B = 8$  T; 2 – ECMAP + HE + drawing,  $B = 8$  T; 3 – HE + drawing,  $B = 5$  T; 4 – ECMAP + HE + drawing,  $B = 5$  T