

PACS: 61.72.Mm, 81.40.Lm

Н.И. Матросов, Л.Ф. Сенникова, Э.А. Медведская, Е.А. Павловская,
В.В. Чишко

ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ 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

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2007 года

Исследовано влияние на заключительной стадии комбинированной (с применением равноканального многоугольного прессования (РКМУП)) обработки количества промежуточных термообработок (до четырех), а также величин деформации между ними ($\epsilon = 1.38-2.77$) и заключительной деформации волочением ($\epsilon = 1.38-5.54$) на механические свойства биметаллической сверхпроводящей проволоки на основе сплава NbTi.

Введение

Основные возможности регулирования фазового состава, механических и физических свойств сверхпроводящей проволоки на основе сплава NbTi заключены в подборе технологических режимов процесса пластической деформации, а также места, количества и режимов термической обработки.

Известно, что обоснованное использование в технологическом процессе получения сверхпроводящей проволоки метода накопления деформаций РКМУП в сочетании с традиционными методами формоизменения, а также термообработкой может привести к желаемым изменениям структурно-фазового состояния и, следовательно, механических и физических свойств сплава NbTi [1,2]. Оптимизация технологического процесса способна значительно повлиять на функциональные характеристики сверхпроводника.

Сопоставление механических и сверхпроводящих свойств свидетельствует о существовании между ними некоторой корреляции. С повышением предела прочности увеличивается и плотность критического тока. Определяя прочностные свойства и используя их как метод экспресс-анализа, можно судить о токонесущей способности сверхпроводника, поскольку механические, как и сверхпроводящие, свойства проволоки зависят от наличия структурных неоднородностей (количества α -фазы, ее размеров и распределения),

которые формируются в результате применения определенных термомеханических обработок [3].

Цель данной работы – оптимизация технологического процесса комбинированной термомеханической обработки сверхпроводника с применением РКМУП, обеспечивающей наноструктурное состояние β -матрицы с повышенным объемным содержанием нанодисперсных частиц α -фазы. Исследовано влияние количества промежуточных термообработок, а также величин деформации между термообработками и заключительной деформации волочением на механические свойства, отражающие структурное состояние сплава.

Материалы и методы исследований

Эксперимент проводили на биметаллических прутках сплава ниобий–титан (Nb–60 ат.% Ti) в медной (МОб) матрице. В качестве объектов технологических исследований использованы полуфабрикаты диаметром 2.4 mm, полученные комбинированными методами деформации. Исходный горячепрессованный прутки подвергали РКМУП с накопленной величиной деформации $e = 9.84$ при единичной за цикл степени деформации $e_1 = 0.82$. Затем осуществляли гидропрессование по маршруту 15.0 \rightarrow 3.6 mm с единичной степенью деформации $e_1 \leq 1.36$. Полученную заготовку волочили с разовыми обжатиями $e_1 \leq 0.22$ по маршруту 3.6 \rightarrow 2.4 mm. Из полуфабриката \varnothing 2.4 mm волочением ($e_1 \leq 0.22$) получены образцы биметаллической сверхпроводящей проволоки диаметром 0.15–0.30 mm по схемам с 1, 2, 3 и 4-я промежуточными термообработками при различных величинах деформации между термообработками ($e = 1.38, 2.77$) и заключительной деформации ($e = 1.38, 2.77, 4.15, 5.54$). Исследованные схемы термомеханической обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Схемы термомеханической обработки

№ схемы	Схема
1	$\varnothing 2.4 \rightarrow 1.2 \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.3$
2	$\varnothing 2.4 \rightarrow 1.2 \rightarrow 0.6^* \rightarrow 0.3$
3	$\varnothing 2.4 \rightarrow 1.2^* \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.3$
4	$\varnothing 2.4 \rightarrow 1.2^* \rightarrow 0.6^* \rightarrow 0.3$
5	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2 \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.15$
6	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2 \rightarrow 0.6^* \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.15$
7	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2^* \rightarrow 0.6^* \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.15$
8	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2^* \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.15$
9	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2^* \rightarrow 0.6^* \rightarrow 0.3^* \rightarrow 0.15$
10	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2^* \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.3^* \rightarrow 0.15$
11	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2 \rightarrow 0.6^* \rightarrow 0.3^* \rightarrow 0.15$
12	$\varnothing 2.4^* \rightarrow 1.2 \rightarrow 0.6 \rightarrow 0.3^* \rightarrow 0.15$

Примечание. На этапах, отмеченных звездочкой, термообработку производили в вакууме 10^{-5} mm Hg при температуре 400°C с выдержкой 1 h.

Общая накопленная деформация РКМУП, гидроэкструзией и волочением на диаметрах 0.30 и 0.15 mm составила соответственно $e = 17.65$ и 19.05 .

Механические испытания биметаллической проволоки проводили на образцах длиной 180–200 mm на разрывной машине ZM-20. Относительная ошибка измерений для σ_b и δ составляла 1%.

Фазовый анализ, исследования параметров тонкой структуры ($\Delta a/a$, D_{CSR}) проводили на дифрактометре ДРОН-УМ1, при этом ошибка измерений вторичной α -фазы составляла 1%, а параметров тонкой структуры – 10%.

Результаты и их обсуждение

Исследования механических свойств проволочных образцов диаметром 0.30 и 0.15 mm, полученных комбинированной деформационно-термической обработкой по указанным технологическим схемам, позволили установить следующие закономерности (табл. 2).

Таблица 2

Влияние схемы термомеханической обработки на механические свойства сверхпроводника

№ схемы	Диаметр образца, mm	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
1	0.30	836	3.2
2		900	3.0
3		910	3.0
4		950	2.9
5	0.30/0.15	900/960	2.35/1.95
6		890/990	2.45/2.0
7		930/990	2.3/2.15
8		890/900	2.3/1.86
9	0.15	960	1.8
10		1020	2.2
11		1000	2.0
12		990	2.05

Из представленных в таблице результатов следует, что с увеличением количества промежуточных термообработок в диапазоне $n_{TT} = 1-4$ (схемы 5, 8, 7, 9) за счет вызванных ими структурно-фазовых изменений в сплаве предел прочности возрастает с 836 до 960 МПа, а относительное удлинение снижается с 3.2 до 1.8% (рисунок).

Влияние величины деформации между термообработками в интервале $e = 1.38$ (сх. 8)– 2.77 (сх. 6) проявляется в том, что для образцов проволоки, полученной по схеме с величиной деформации между двумя термообработками $e = 2.77$, характерна более высокая прочность, составляющая 980 против 900 МПа.

Исследование влияния величины заключительной деформации волочением при одной промежуточной термообработке (схемы 2, 3, 5) показало, что интен-

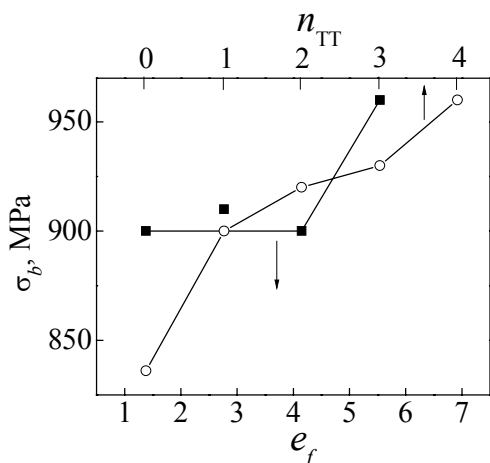


Рис. Зависимость прочности биметаллической проволоки σ_b на основе сплава 60Т от количества промежуточных термообработок $n_{\text{ТТ}}$ и величины заключительной деформации волочением e_f

элементов и повышению при этом уровня микронапряжений. Параметры тонкой структуры составляют: $D_{\text{CSR}} = 48 \text{ nm}$, $\Delta a/a = 1.91 \cdot 10^{-3}$; механические свойства: $\sigma_b = 950 \text{ MPa}$, $\delta = 2.9\%$. Для сравнения, у образцов, полученных по сх. 1 (без промежуточных термообработок), аналогичные характеристики составляют: $D_{\text{CSR}} = 58 \text{ nm}$, $\Delta a/a = 1.72 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_b = 836 \text{ MPa}$, $\delta = 3.2\%$.

На основании корреляционных зависимостей плотности критического тока от прочности, установленных в работе [3], можно предположить, что образцы с высокой прочностью характеризуются и высокой токонесущей способностью, а схемы их изготовления представляют особый интерес с точки зрения оптимизации технологии получения сверхпроводника. Оптимизация деформационно-термической обработки на заключительном этапе изготовления сверхпроводящей проволоки повышает эффективность наноструктурирования с формированием более совершенной нанокристаллической структуры матричного β -раствора и выделений α -Тi в сплаве.

Направление исследований имеет большое практическое значение: позволяет реализовать термообработку на гибких, легко сворачивающихся в бухту заготовках без создания специального оборудования для термического воздействия. Исследования требуют продолжения в плане системного изучения транспортных свойств, что позволит разработать научные основы технологии, обеспечивающей повышенный уровень сверхпроводящих свойств сплава.

Выводы

1. Установлены закономерности влияния на заключительной стадии комбинированной (с применением РКМУП) обработки количества промежуточных термообработок, величины деформации между ними и величины за-

сивность упрочнения повышается при достижении степени заключительной деформации $e > 4.15$ (рисунок).

Максимальные (1000–1020 МПа) значения предела прочности зафиксированы при реализации схем 10 и 11 (с тремя промежуточными термообработками при величине деформации $e = 2.77$ и $e = 1.38$ между ними).

Рентгеноструктурные исследования образцов диаметром 0.30 mm, полученных по сх. 4, показали, что применение даже двух промежуточных термообработок приводит к увеличению объемного содержания α -фазы до 8.5% за счет активизации β -матричного распада, к более значительному измельчению структурных

ключительной деформации волочением на механические свойства биметаллической сверхпроводящей проволоки на основе сплава NbTi.

2. Особый интерес представляют технологические схемы получения образцов с повышенной (950–1020 МПа) прочностью, отражающей существенные изменения в структурном состоянии сплава.

1. 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).
2. В.З. Спусканюк, Н.И. Матросов, В.В. Чишко, Е.А. Павловская, Л.Ф. Сенникова, *ФТВД* **16**, № 2, 43 (2006).
3. Л.Ф. Сенникова, Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, Донецк (1995).

N.I. Matrosov, L.F. Sennikova, E.A. Medvedskaya, E.A. Pavlovskaya, V.V. Chishko

DEFORMATION AND THERMAL TREATMENT OF WIRE BASED ON NbTi ALLOY

Influence of the quantity of intermediate treatments (up to four), value of intermediate deformation ($e = 1.38\text{--}2.77$) and value of final deformation by drawing ($e = 1.38\text{--}5.54$) on mechanical properties of bimetallic wire made of NbTi based alloy has been investigated at the final stage of combined (using the equal-channel multiple angle pressing (ECMAP)) treatment.

Fig. Dependence of the strength σ_b of 60T alloy-based bimetallic wire on the quantity of intermediate thermal treatments n_{TT} and value of final deformation e_f by drawing