

PACS: 81.40.Ef, 61.72.Mm

В.А. Белошенко, Н.И. Матросов, В.В. Чишко, В.П. Дьяконов,
Л.Ф. Сенникова, О.Н. Миронова, Э.А. Медведская, Б.А. Шевченко

РАВНОКАНАЛЬНОЕ МНОГОУГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ МНОГОВОЛОКНИСТОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КОМПОЗИТА

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

Рассмотрены условия реализации равноканального многоугольного прессования (РКМУП) многоволоконного композита, содержащего в медной матрице 210 волокон из сплава NbTi. Приведены данные о влиянии РКМУП на физико-механические свойства многоволоконного сверхпроводящего провода.

Введение

Перспектива применения деформируемых жестких сверхпроводников на основе сплава NbTi обусловлена комплексом их свойств. Сверхпроводящие материалы должны обладать следующими достоинствами: технологичностью их изготовления, хорошими механическими свойствами (сочетанием прочности и пластичности), высокими электрофизическими параметрами, в частности повышенной плотностью критического тока и низкими потерями на переменные токи. Идеальным решением снижения потерь на переменные токи является использование многоволоконного провода, состоящего из тонких сверхпроводящих волокон, встроенных в матрицу обычного проводника [1].

Среди различных методов обработки сверхпроводящих материалов особый интерес представляют методы пластической деформации, основанные на накоплении деформации без изменения сечения [2].

Ранее нами рассмотрены закономерности влияния метода РКМУП на структуру и свойства сплава NbTi при многоцикловогой обработке в дробном режиме биметаллической прутковой заготовки (полуфабриката) при накоплении величины деформации до $\epsilon = 13.12$ [3,4]. Показана эффективность преобразования структуры под воздействием РКМУП [5]. Немонотонная деформация РКМУП в сочетании с последующим монотонным деформированием гидроэкструзией (ГЭ) и волочением, а также термообработкой (ТО),

позволяет существенно улучшить функциональные свойства сверхпроводника в биметаллическом исполнении за счет создания в сплаве однородной наноструктуры с равноосными зернами β -матрицы и нанодисперсными выделениями вторичной α -фазы.

Настоящая работа посвящена выяснению условий реализации РКМУП применительно к деформации многоволоконного сверхпроводящего композита на основе сплава NbTi с повышенным содержанием титана, оценке его деформируемости и физико-механических свойств.

Материалы и методы исследований

В качестве исходных заготовок использовали прутки диаметром 15 mm, содержащие 210 волокон из сплава Nb + 50 wt.% Ti (HT50) в медной (M06) матрице с коэффициентом заполнения по сплаву 50%, полученные пакетной технологией с применением горячего прессования и гидропрессования при комнатной температуре. Микротвердость исходного сплава в деформированном состоянии составляла 2100 МПа, после термообработки при 375°C в течение 1 h – 1700 МПа.

Образцы длиной 80 mm подвергали деформации методом РКМУП на лабораторной установке (рис. 1), смонтированной на гидравлическом прессе усилием 2.5 MN. Экспериментальная технологическая оснастка подробно описана в работе [6]. РКМУП осуществляли по схеме продавливания заготовки через трехугловую деформирующую систему из 4 пересекающихся каналов одинакового сечения с половинными углами пересечения $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 70^\circ$, $\theta_3 = 80^\circ$ при степени деформации за проход $e_1 = 0.82$. Степень единичной и накопленной деформации e

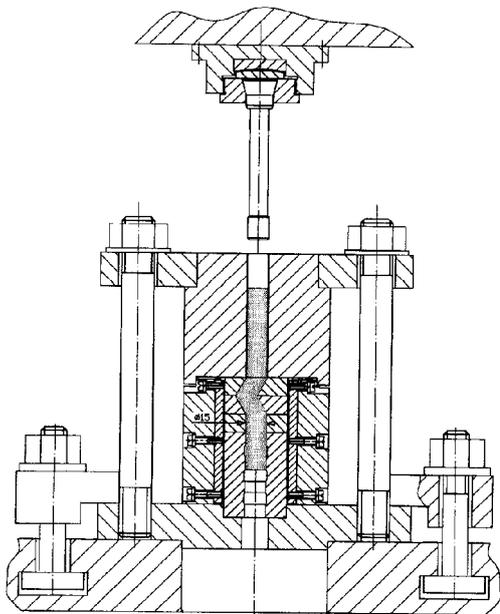


Рис. 1. Схема лабораторной установки для РКМУП

определяли согласно рекомендациям работы [3]. Для целенаправленного формирования структуры сплава в каждом последующем цикле прессования прутковую заготовку поворачивали на 90° вокруг ее продольной оси и на 180° – в поперечном направлении. Отбор образцов для исследований производили по осуществлению количества проходов, кратного четырем.

Часть заготовок деформировали ГЭ до диаметра 3.6 mm с единичной степенью деформации $e \leq 1.2$, а затем волочили с частными деформациями $e \leq 0.2$ для получения проволоки диаметром 0.3 mm. Другую часть заготовок подвергали РКМУП с накопленной величиной деформации $e = 3.28$

(4 прохода), 6.56 (8 проходов) и 9.84 (12 проходов), после чего деформировали ГЭ и волочением по указанным выше режимам и маршрутам с суммарной величиной монотонного формоизменения $e = 7.82$.

Особенности изменения структуры композита изучали с помощью оптического микроскопа «Neophot». Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 g, погрешность измерений составляла 5%.

Механические свойства (предел прочности σ_b и относительное удлинение δ) многоволоконного провода оценивали при испытаниях на растяжение образцов длиной 200 mm на разрывной машине ZM-20, при этом относительная ошибка измерений составляла 2.5%. Предел прочности сплава определяли, используя правило смеси.

Измерения физико-механических характеристик осуществляли на образцах в деформированном и термообработанном состояниях. ТО 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 K в поперечном внешнем магнитном поле 3, 5 и 7 T.

Результаты исследований и их обсуждение

Реализация процесса РКМУП многоволоконного сверхпроводящего композита была обеспечена рациональной наладкой инструментальной оснастки. Она исключала возникновение облоя материала в процессе РКМУП между деформирующими элементами (контейнером и втулками) и сохраняла прямолинейность заготовки после ее проталкивания с возможностью повторного размещения в канале контейнера. Этому способствовало также

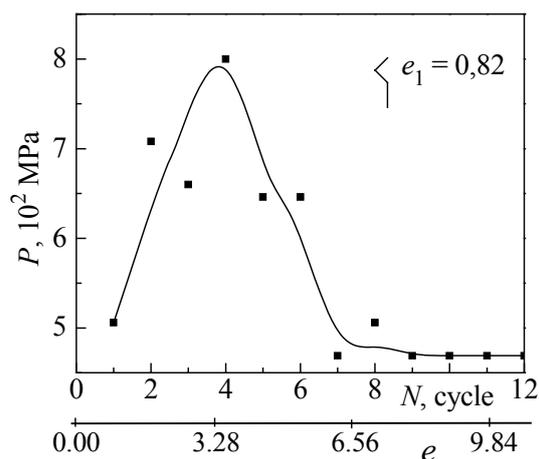


Рис. 2. Зависимость давления прессования многоволоконного композита от величины накопленной деформации РКМУП

применение эффективной консистентной смазки, снижающей контактное трение и предотвращающей налипание сплава на стенки деформирующего канала втулок. В результате достигнута величина накопленной деформации РКМУП $e = 9.84$ при давлении прессования 500–800 МПа. При этом наблюдался немонотонный характер изменения давления прессования P с максимумом при $e = 3.28$ (рис. 2). Зависимость $P(e)$ отражает процессы структурных изменений в деформируемом композите и их влияние на сопротивление деформированию, а также изменения контактно-

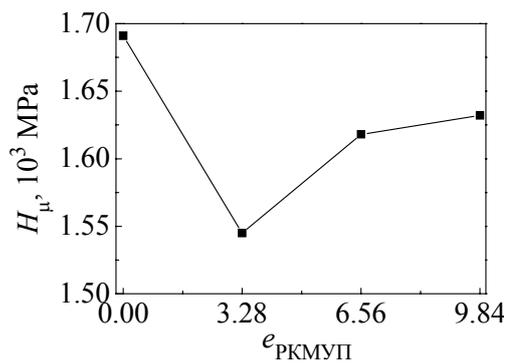


Рис. 3. Зависимость микротвердости сплава HT50 от величины деформации РКМУП

го трения заготовки с инструментом, обусловленные сглаживанием микронеровностей деформирующего канала за счет заполнения их медью и повышения при этом температурно-скоростных параметров прессования.

В процессе изучения влияния деформации РКМУП на структуру и микротвердость сплава выявлены следующие закономерности. На рис. 3 представлена зависимость микротвердости от величины деформации, полученная после заключительной ТО

при 375°C, 1 h. Измерения выполнены на образцах диаметром 15 mm с количеством волокон 210 штук. Видно, что сплав HT50 в данном случае ведет себя как циклически разупрочняющийся материал. Такое поведение характерно для материалов после сильной холодной деформации, в частности для высокопрочных сплавов, содержащих большое количество дисперсных выделений вторичных фаз [7]. Оно связано с особенностями их пластической деформации и формирующейся дислокационной структуры, зависящими от исходного состояния.

Микрофотографии поперечного сечения многоволоконистого (210 волокон) провода диаметром 0.3 mm с ниобий-титановыми волокнами диаметром 0.014 mm показаны на рис. 4. Они свидетельствуют о том, что при комбинированной обработке с применением РКМУП достигается равномерность деформации компонентов волоконистого материала. Различия в величинах коэффициента заполнения по сплаву композита, полученного с применением РКМУП ($e = 9.84$) и без него, минимально. В первом случае коэффициент составляет 47%, во втором – 46%.

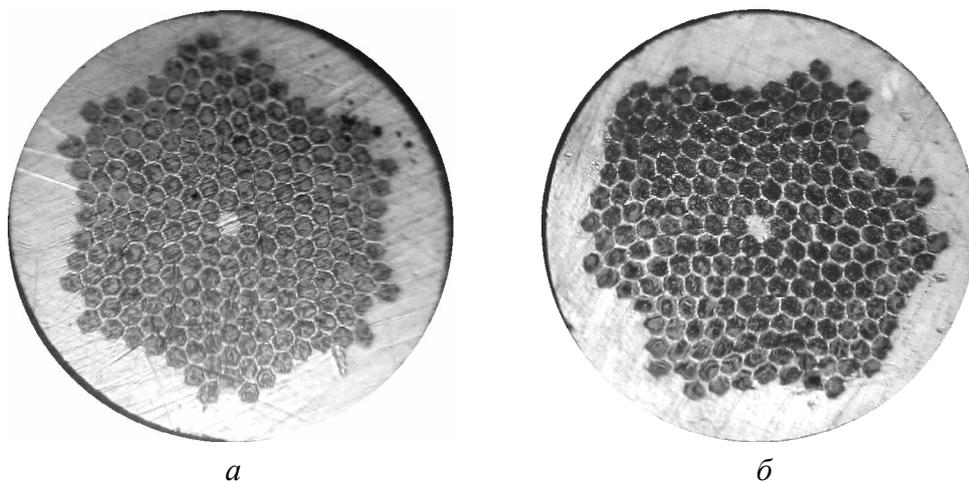


Рис. 4. Микрофотографии поперечного сечения многоволоконистого провода: *а* – без применения РКМУП, *б* – с применением РКМУП

Исследования закономерности влияния комбинированной обработки на прочностные и пластические свойства многоволоконного провода (таблица) показали, что с увеличением степени деформации РКМУП в исследованном интервале $e = 0-9.84$ их существенного изменения не наблюдается. Эта тенденция сохраняется и после заключительной ТО в диапазоне температур 300–400°C.

Таблица

Механические свойства многоволоконного провода после деформации и ТО

$e_{\text{РКМУП}}$	Температурная обработка, °С											
	20		300		325		350		375		400	
	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
0	945	3.0	774	3.0	761	2.7	740	3.1	713	3.0	671	2.83
3.28	942	3.2	805	2.8	791	2.8	756	2.8	710	3.0	713	2.53
6.56	859	2.8	825	2.9	715	2.6	699	3.0	699	2.9	675	3.5
9.84	944	3.2	740	2.94	780	3.0	735	3.06	687	3.2	687	3.5

Предел прочности и относительное удлинение провода в деформированном состоянии составляют соответственно 940 МПа и 3%, в термообработанном при 375°C, 1 h – 700 МПа и 3%, что отвечает высокому уровню для данной конструкции многоволоконного сверхпроводника.

Напряженно-деформированное состояние, инициированное большой немонотонной пластической деформацией в комбинации с последующим мо- нотонным формоизменением, обеспечивает улучшение функциональных свойств сверхпроводника за счет увеличения плотности критического тока J_c (рис. 5). В магнитном поле 5 Т у деформированных образцов, полученных

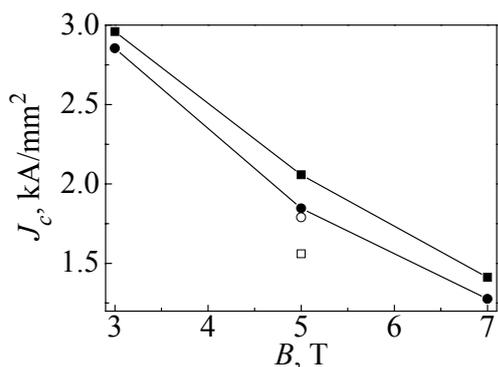


Рис. 5. Зависимости плотности критического тока многоволоконного провода от величины магнитного поля и ТО: ■, □ – без ТО при $e_{\text{РКМУП}} = 9.84$ и 0 соответственно; ●, ○ – ТО, 375°C, 1 h при $e_{\text{РКМУП}} = 9.84$ и 0 соответственно

с применением РКМУП, $J_c = 2.1 \cdot 10^3$ А/мм², у образцов, полученных без применения РКМУП, $J_c = 1.56 \cdot 10^3$ А/мм². Величина плотности критического тока исследуемых образцов по-разному зависит от заключительной ТО, подтверждая известное положение о том, что для каждой конкретной технологической схемы изготовления сверхпроводника необходим свой рациональный режим термомеханической обработки. В первом случае ТО при 375°C, 1 h приводит к снижению плотности критического тока, во втором – к повышению, уменьшая разницу в его значениях (рис. 5).

Выводы

1. Включение РКМУП в технологическую схему получения многоволоконного сверхпроводящего провода из сплава НТ50 в медной матрице не приводит к существенному изменению его механических свойств как в деформированном, так и отожженном состояниях.

2. РКМУП способствует повышению плотности критического тока в деформированном многоволоконистом сверхпроводящем проводе.

Работа была выполнена при поддержке Minister Nauki i Szkolnictwa Wyszego (Poland) (проект NN 508392035).

1. *Е.М. Савицкий, Ю.В. Ефимов, Я. Кружляк и др.*, Физико-химические основы получения сверхпроводящих материалов, Металлургия, Москва (1981).
2. *L. Olejnik, A. Rosochowski*, Bull. Pol. Ac.: Tech. **53**, 413 (2005).
3. *В.А. Белошенко, Н.И. Матросов, В.В. Чишко, Е.А. Павловская, Л.Ф. Сенникова, О.Н. Миронова*, Металлофиз. новейшие технол. **27**, 347 (2007).
4. *Н.И. Матросов, В.В. Чишко, Л.Ф. Сенникова, Е.А. Павловская, О.Н. Миронова, Э.А. Медведская*, Вопросы материаловедения № 2, 60 (2007).
5. *Т.Е. Константинова, В.А. Белошенко, В.З. Спусканюк, Н.И. Матросов, В.А. Глазунова, Л.В. Лоладзе*, Тезисы 9-й Международной конференции «Высокие давления – 2006. Фундаментальные и прикладные аспекты», Норд-Пресс, Донецк (2006), с. 145.
6. *В.А. Белошенко, Е.А. Павловская, Н.И. Матросов, Л.Ф. Сенникова, В.В. Чишко, Э.А. Медведская*, Металлы № 3, 72 (2007).
7. *В.С. Золотаревский*, Механические свойства металлов, Металлургия, Москва (1983).

В.О. Білошенко, М.І. Матросов, В.В. Чишко, В.П. Дияконов, Л.Ф. Сеннікова, О.М. Міронова, Е.О. Медведська, Б.А. Шевченко

РІВНОКАНАЛЬНЕ БАГАТОКУТОВЕ ПРЕСУВАННЯ БАГАТОВОЛОКНИСТОГО НАДПРОВІДНОГО КОМПЗИТУ

Розглянуто умови реалізації рівноканального багатокутового пресування (РКБКП) багатОВОЛОКНИСТОГО КОМПЗИТУ, в мідній матриці якого міститься 210 волокон із сплаву NbTi. Приведено дані про вплив РКБКП на фізико-механічні властивості багатОВОЛОКНИСТОГО НАДПРОВІДНОГО ДРОТУ.

V.A. Beloshenko, N.I. Matrosov, V.V. Chishko, V.P. Dyakonov, L.F. Sennikova, O.N. Mironova, E.A. Medvedskaya, B.A. Shevchenko

EQUAL-CHANNEL MULTIANGULAR PRESSING OF MULTIFIBRE SUPERCONDUCTING COMPOSITE

Conditions for realization of equal-channel multiangular pressing (ECMAP) of multifibre composite with 210 NbTi-alloy fibres in copper matrix have been considered. Data on

ECMAP effect on physical and mechanical properties of multifibre superconducting wire are given.

Fig. 1. Schematic of laboratory plant for ECMAP

Fig. 2. Dependence of pressure for multifibre composite pressing on value of accumulated deformation by ECMAP

Fig. 3. Dependence of HT50 alloy microhardness on value of defomation by ECMAP

Fig. 4. Microphotographs of multifibre wire cross-section: *a* – no ECMAP applied, *b* – ECMAP applied

Fig. 5. Dependences of critical-current density for multifibre wire on magnetic field value and thermal treatment: ■, □ – no TT for $e_{\text{ECMAP}} = 9.84$ and 0, respectively; ●, ○ – TT, 375°C, 1 h for $e_{\text{ECMAP}} = 9.84$ and 0, respectively