

PACS: 81.40.Ef, 61.72.Mm

А.Б. Дугадко, Л.Ф. Сенникова, Е.А. Павловская, Б.А. Шевченко,  
В.З. Спусканюк, Э.А. Медведская, Н.И. Матросов, В.Ю. Дмитренко

## ОСОБЕННОСТИ СИЛЬНОДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕДИ ВОЛОКНИСТОГО СТРОЕНИЯ

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

*Исследованы закономерности деформационного упрочнения, эволюции и структуры меди волокнистого строения (МВС) на различных стадиях получения от мономеди до МВС дисперсностью  $n_f = 211^3$ . Приведены качественные и количественные оценки, отражающие «барьерный» и структурный механизмы упрочнения.*

### Введение

В настоящее время специалистами в области материаловедения и новейших технологий большое внимание уделяется созданию принципиально новых функциональных материалов, обладающих рядом уникальных физико-механических свойств и имеющих непосредственный практический интерес. К таким материалам можно отнести волокнистые наноструктурные материалы, которые можно получить многостадийной пакетной гидроэкструзией.

В ранее опубликованных работах [1–6] уже затрагивались вопросы структурообразования МВС, ее отличие от обычной меди, особенности механического поведения при различных температурах. Дальнейшее развитие этих представлений требует накопления экспериментальных данных о структуре и свойствах высокодеформированных материалов. В настоящей работе мы расширили представления об особенностях сильнодеформированного состояния (СДС) МВС, исследуя закономерности деформационного упрочнения, эволюцию структуры, термостабильность и релаксационные свойства, и получили качественные и количественные оценки, отражающие «барьерный» и структурный механизмы упрочнения.

### Материалы и методы исследования

Объектом для исследований служили образцы диаметром 0.1–3 mm, отобранные на различных этапах получения МВС от мономеди до МВС с количеством волокон  $n_f = 211^3$ . Исследовали образцы дисперсностью  $n_f = 1; 211;$

211<sup>2</sup>; 211<sup>3</sup>. Диапазон суммарной пластической деформации гидропрессованием и волочением при этом составлял  $\ln R = 2.77-26$ .

Закономерности деформационного упрочнения МВС изучали с помощью метода микроиндентирования на приборе ПМТ-3 и испытаний на продольный разрыв на разрывной машине ЗМ-20.

Термостабильность структуры изучали после температурного воздействия в диапазоне температур нагрева  $T = 125-500^\circ\text{C}$ . Эволюцию тонкой структуры (размер области когерентного рассеяния (ОКР), уровень микронапряжений, плотность дислокаций) исследовали с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-УМ1.

### Результаты и их обсуждение

В результате исследования микротвердости и продольной прочности на разрыв МВС установлено, что отклонение от обычного поведения материала наблюдается в диапазоне величин накопленной интегральной деформации  $e = \ln R = 22-26$ . Накопление такой большой пластической деформации переводит МВС в новое метастабильное СДС, которое характеризуется аномально высокими величинами прочности ( $\sigma_b = 610$  МПа) и микротвердости ( $H_\mu = 1160$  МПа) для данного материала (рис. 1). Особенности СДС являются соизмеримость структурных элементов (СЭ) с характеристиками (размерными параметрами) многих физических явлений, существенное возрастание объемной доли границ СЭ и сильнонеравновесное состояние этих границ. Специфической особенностью МВС является также то, что в качестве СЭ выступают сами волокна, границы между которыми имеют искусственное происхождение. Это также служит причиной проявления необычных свойств МВС.

Интенсивность деформационного упрочнения МВС с наноразмерными волокнами, подвергнутой деформации из полностью рекристаллизованного состояния, после отжига при  $T = 400^\circ\text{C}$  с выдержкой 1 h в 1.4-1.6 раз больше, чем для мономеди. Интегральная деформация  $e \sim 3$  на 80% восстанавливает значения прочности МВС, доводя их до уровня  $\sigma_b \sim 500$  МПа (рис. 2). Относительная интенсивность упрочнения МВС остается более высокой во всем этом диапазоне интегральных деформаций (рис. 3).

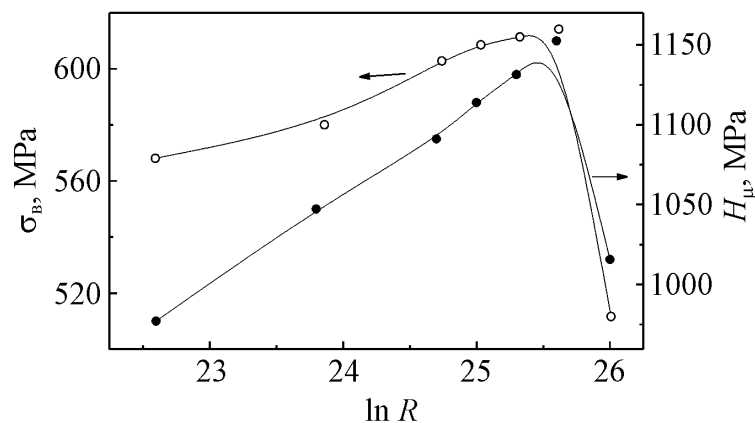


Рис. 1. Величина микротвердости и продольной прочности на разрыв МВС в зависимости от накопленной деформации

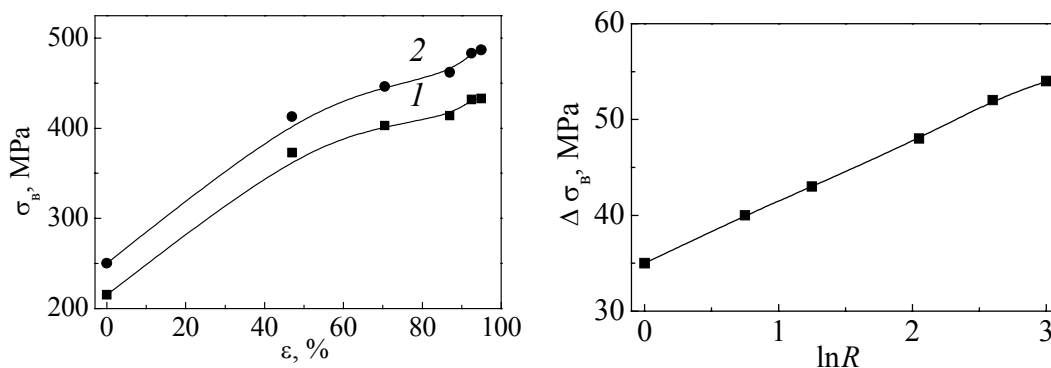


Рис. 2. Характер деформационного упрочнения монометалла (кривая 1) и МВС (кривая 2)

Рис. 3. Относительная интенсивность упрочнения МВС

Термическое воздействие при отжиге длительностью 1 h в диапазоне температур  $T = 125\text{--}400^\circ\text{C}$  различным образом сказывается на процессах возврата и рекристаллизации в монометалле и МВС (рис. 4). В МВС эти процессы начинаются позже и идут менее интенсивно, а характеристики прочности в полностью рекристаллизованном состоянии стабилизируются на более высоком уровне. Другими словами, исследуемый материал в СДС обладает повышенной термической устойчивостью. Термостойкость МВС превышает данную характеристику для монометалла во всем исследуемом интервале температур отжига. Особенно заметно эта разница проявляется при температурах  $T = 150\text{--}300^\circ\text{C}$  (рис. 5).

В результате исследования временной устойчивости высокопрочных свойств МВС на образцах диаметром 0.55 mm ( $\ln R = 22.5$ ) с исходной прочностью  $\sigma_{в} = 510\text{--}530$  МПа установлено, что полная релаксация свойств происходит за время вылеживания при комнатной температуре  $\tau \sim 8 \cdot 10^3$  h. Предел прочности при этом стабилизируется на уровне  $\sigma_{в} \sim 490\text{--}510$  МПа. После дополнительного деформирования из полностью срелаксированного состояния с интегральной деформацией  $e \sim 3$  эти значения возрастают до  $\sigma_{в} = 610$  МПа.

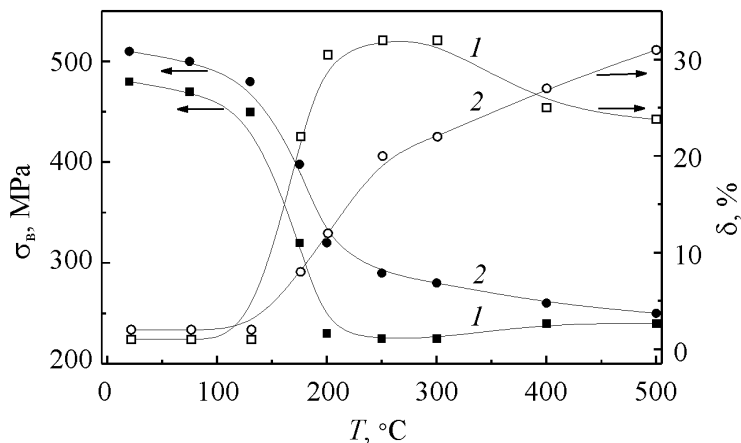


Рис. 4. Термостойкость монометалла (1) и МВС (2)

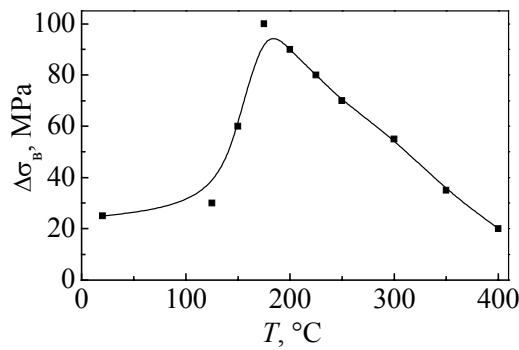


Рис. 5. Относительная термостойкость МВС

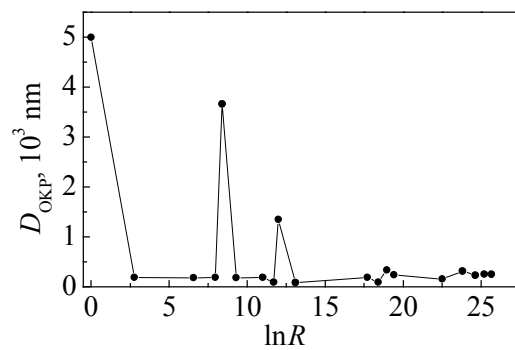


Рис. 6. Многостадийный характер структурообразования МВС

Отличительной особенностью МВС в СДС является также немонотонность изменения характеристик материала, где наблюдается полная корреляция изменений прочности с изменением параметров тонкой структуры: величины микронапряжений  $\Delta a/a$  и размеров  $D_{\text{окр}}$ . Этот факт отражает конкуренцию процессов деформационного упрочнения и спонтанно протекающую динамическую рекристаллизацию меди в СДС. Высокопрочное состояние МВС с количеством волоконных структурных элементов  $n_f = 211^3$  характеризуется следующими параметрами тонкой структуры:  $D_{\text{окр}} = 250 \text{ nm}$ ;  $\rho_g = 5.05 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ;  $\Delta a/a = 0.401 \cdot 10^{-3}$ .

Установлен многостадийный характер эволюции тонкой структуры при больших пластических деформациях МВС, обусловленный протеканием динамической и метадинамической рекристаллизации (рис. 6). В диапазоне деформаций  $\ln R \leq 26$  обнаружено четыре стадии структурной перестройки с тенденцией формирования более мелких элементов, чем на стадии, предшествующей микро-рекристаллизации. Такой эффект объясняется тормозящим влиянием толщины волоконных структурных элементов, приближающихся к наноразмерному уровню, барьерной ролью их границ. Параметры тонкой структуры в процессе пакетного гидропрессования и волочения меди, тенденция уменьшения плотности дислокаций, микронапряжений и некоторое увеличение ОКР свидетельствуют о различном характере деформирования меди с субмикроструктурной структурой и протекании в МВС периодических релаксационных процессов в ходе пластической деформации и после ее завершения. По достижении степени деформации, при которой накапливается большая плотность дислокаций и дислокационной энергии, происходит своеобразный структурный взрыв – мелкоячеистая структура перестраивается, освобождаясь от дислокаций. В ходе дальнейшей деформации микро-рекристаллизованная область вновь фрагментируется.

### Выводы

1. Обнаружено anomalous поведение микротвердости МВС при достижении высокой суммарной деформации  $\ln R = 23.8\text{--}25.6$ , коррелирующее с характером изменения продольной прочности.

2. Установлен более интенсивный характер упрочнения МВС по сравнению с мономедью.

3. Установлен многостадийный характер эволюции тонкой структуры ( $D_{\text{ОКР}}$ ,  $\Delta a/a$ ) при больших пластических деформациях МВС, обусловленный протеканием динамической и метадинамической рекристаллизации и барьерной ролью при этом границ волокон.

4. Высокопрочное состояние МВС с количеством волокон  $n_f = 211^3$  характеризуется следующими параметрами тонкой структуры:  $D_{\text{ОКР}} = 250 \text{ nm}$ ;  $\Delta a/a = 0.401 \cdot 10^{-3}$ ;  $\rho_g = 5.05 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

1. В.З. Спусканюк, Л.Ф. Сенникова, Е.А. Павловская, Н.И. Матросов, А.Б. Дугадко, Металлофиз. новейшие технол. **25**, 445 (2003).
2. В.З. Спусканюк, Л.Ф. Сенникова, Н.Н. Белоусов и др., Прогрессивные технологии и системы машиностроения, Международный сборник научных трудов, ДонНТУ, Донецк (2002), вып. 21, с. 255–260.
3. Р.У. Канн, Физическое металловедение, Мир, Москва (1968).
4. В.М. Быков, В.А. Лихачев, Ю.А. Николаев, Л.Л. Сербина, Л.И. Шибалова, ФММ **45**, 163 (1978).
5. В.С. Иванова, А.В. Корзников, Металлы № 1, 103 (2002).
6. В.М. Фарбер, О.В. Селиванова, Металлы № 3, 45 (2003).

*A.B. Dugadko, L.F. Sennikova, E.A. Pavlovskaya, B.A. Shevchenko, V.Z. Spuskanyuk, N.I. Matrosov, V.Yu. Dmitrenko*

## FEATURES OF HIGHLY DEFORMED STATE OF FIBROUS-STRUCTURE COPPER

Regularities of strain hardening, evolution and structure of fibrous-structure copper (FSC) at different stages of production from monocopper to FSC with the degree of dispersion  $n_f = 211^3$  have been investigated. Qualitative and quantitative estimates are given that indicate to the «threshold» and structural mechanisms of hardening.

**Fig. 1.** Microhardness and transverse rupture strength of FSC vs. the accumulated strain

**Fig. 2.** Character of strain hardening for monocopper (curve 1) and FSC (curve 2)

**Fig. 3.** Relative intensity of FSC hardening

**Fig. 4.** Thermal stability of monocopper (1) and FSC (2)

**Fig. 5.** Relative thermal stability of FSC

**Fig. 6.** Multi-stage character of FSC structure formation