

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).

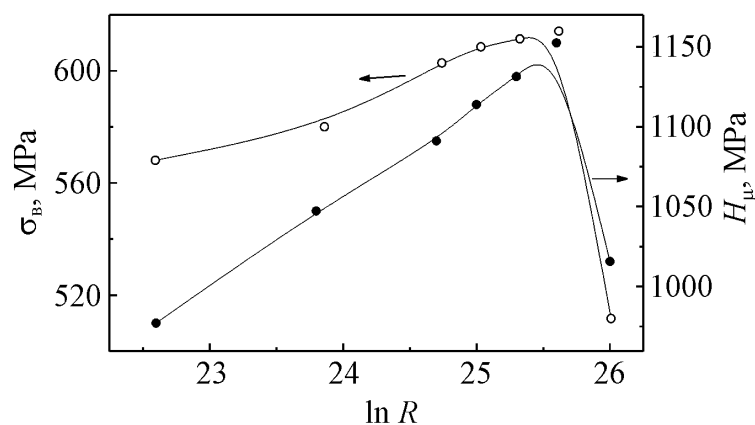


Рис. 1. Величина микротвердости и продольной прочности на разрыв МВС в зависимости от накопленной деформации

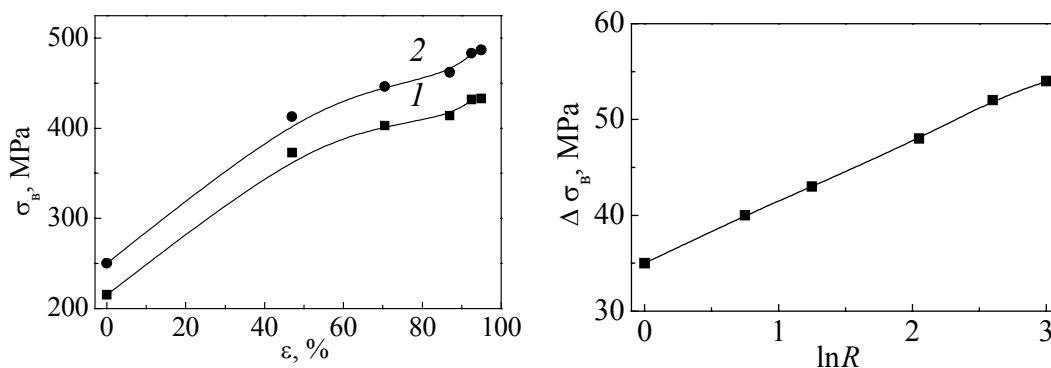


Рис. 2. Характер деформационного упрочнения мономеди (кривая 1) и МВС (кривая 2)

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 мономеди 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 мономеди 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.

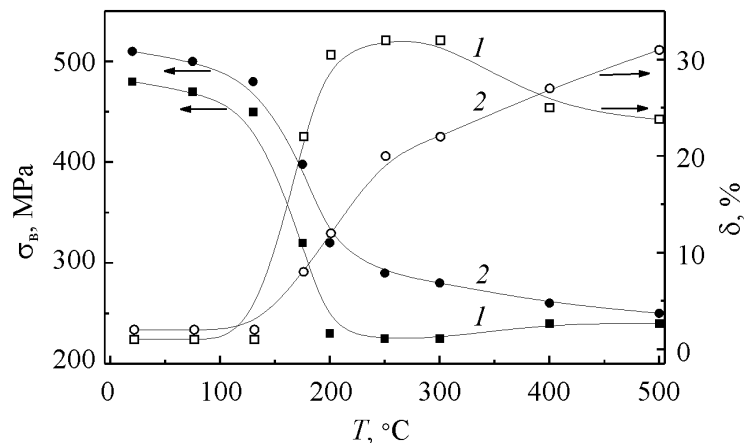


Рис. 4. Термостойкость мономеди (1) и МВС (2)

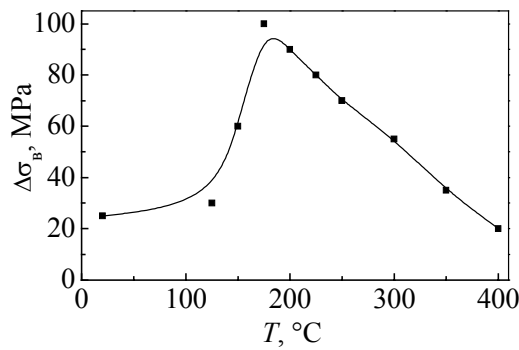


Рис. 5. Относительная термостойкость МВС

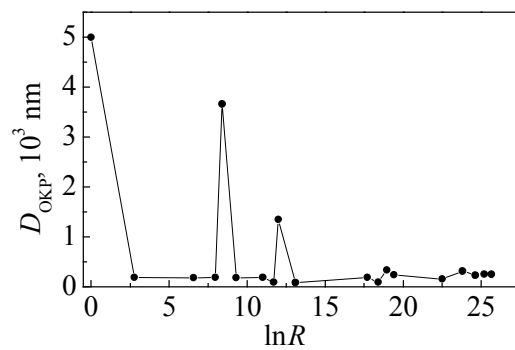


Рис. 6. Многостадийный характер структурообразования МВС

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