

PACS: 61.72.Ff

М.О. Кралюк<sup>1</sup>, О.Г. Пашинська<sup>2</sup>, М.М. Мишляєв<sup>3</sup>, І.І. Тищенко<sup>2</sup>

ФОРМУВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МІДІ  
В УМОВАХ ДЕФОРМАЦІЇ ВОЛОЧІННЯМ, СУМІЩЕНОЇ З КРУТІННЯМ,  
ЗІ ЗМІНОЮ НАПРЯМКУ ОБЕРТАННЯ НА ПРОТИЛЕЖНИЙ

<sup>1</sup>Донецький науково-дослідницький інститут Міністерства юстиції України  
вул. Дубравна, 16, м. Донецьк, 83102, Україна

<sup>2</sup>Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України  
вул. Р. Люксембург, 72, м. Донецьк, 83114, Україна

<sup>3</sup>Інститут металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН  
Ленінський проспект, 49, м. Москва, 119991, Росія

Стаття надійшла до редакції 26 січня 2010 року

*Розглянуто вплив структуроутворення на формування фізико-механічних властивостей мідної заготовки під час холодної комбінованої пластичної деформації зі зсувом (КПДЗ), яка полягає у волочинні з крутінням зі зміною напрямку обертання на протилежний. Показано нелінійні зміни фізичних і механічних властивостей внаслідок конкурентного розвитку фрагментації і рекристалізації.*

**Ключові слова:** мідь, волочиння, крутіння, структура, властивості, комбінована деформація

На сучасній стадії розвитку науки і техніки дослідники пропонують використовувати КПДЗ як один з найефективніших способів отримання ультрадрібнозернистих напівфабрикатів. Цей спосіб полягає у волочинні зі зсувом за рахунок прикладення сили, що тягне дріт через дві послідовно розташовані конічні волокни з одночасним обертанням однієї з них [1]. Додаткове прикладення навантаження, що крутить, дозволяє реалізувати жорсткішу схему деформації в порівнянні з простим розтягуванням. Це сприяє формуванню структури із зерном меншого розміру і досягненню більш високих показників характеристик міцності. Проте в умовах одночасної дії навантажень, які розтягують і крутять, в матеріалі разом з підвищенням міцності відбувається зниження електропровідності та зростання пластичних властивостей [2].

Виконані останнім часом дослідження звертають увагу на комбіновану обробку матеріалів, під час якої напрямок прикладення навантаження змінюють на протилежний. Такий вид деформації супровод-

жується зміною кристалографічної текстури та ефектом, подібним до ефекта Баушингера [3,4].

У роботі [5] показано, що зі зміною напрямку прикладення деформуючого навантаження відбувається протікання в структурі металів і сплавів таких релаксаційних процесів, як повернення, полігонізація та рекристалізація, які зумовлюють нелінійне змінення їх фізико-механічних властивостей. Процеси повернення, динамічної полігонізації і навіть рекристалізації *in situ* відзначалися різними вченими у ході дослідження еволюції структури матеріалів під час холодної пластичної деформації зі зміною напрямку деформуючого навантаження [6–9]. Протікання повернення у процесі холодної деформації скручуванням зі зміною напрямку обертання на протилежний автори роботи [10] пояснюють зростанням температури до 90°C. Дане значення температури оцінюється як середнє за зразком, тобто у локальному місці зразка очікуватиметься більш високе її значення.

У напрямку розвитку методів КПДЗ з'явилося багато робіт, які доповнюють і узагальнюють одна одну [11–13]. Проте пропонувані на даний час способи КПДЗ не можуть бути використаними для поточного виробництва, оскільки накопичений матеріал щодо впливу КПДЗ на процеси структуроутворення вимагає узагальнення і створення теорії для цілеспрямованого управління комплексом властивостей.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження впливу структурної зміни на формування фізико-механічних властивостей матеріалу під час використання КПДЗ на прикладі експерименту з волочінням, суміщеним з розтягуванням, зі зміною напрямку обертання на протилежний. Аналіз результатів такого дослідження дозволяє розробити підхід до оптимізації схеми деформації, що сприятиме отриманню нового комплексу фізико-механічних властивостей.

### Матеріал і методика експерименту

Круглий дрiт з міді марки М1 діаметром 6.5 mm протягували через чотири послідовно розташовані конічні волокни з сумарним обтисненням 60%. Маршрут традиційного волочіння наступний: 6.5 → 6.0 → 5.1 → 4.55 → 3.8 → 3.2 → 2.75 → 2.54. Швидкість волочіння – 1 m/s. Потім проводили волочіння за маршрутом 2.54 → 2.44 → 2.2 → 1.96 в умовах обертання в протилежних напрямках волок (на Ø2.44 і 1.96 mm), а волокни на Ø2.54 і 2.2 mm залишалися нерухомими.

Після деформації на зразках вимірювали електроопір 4-зондовим методом. Механічні випробування проводили із записом діаграми розтягування на універсальній дослідницькій машині УТС-10 з системою мікрокомп'ютерного керування і максимальним навантаженням 10000 N. Робоча довжина зразків складала 100 mm. За допомогою діаграм розтягування визначали такі властивості міцності міді, як границя міцності та границя текучості. Для точнішого визначення пластичності матеріалу розраховували відносне звуження  $\psi$  за формулою [14]:

$$\psi = \frac{F_0 - F_{\min}}{F_0} 100\%,$$

де  $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу зразка,  $F_{\min}$  – мінімальна площа поперечного перерізу зразка після розриву.

За результатами вимірювань робили зрівняльний аналіз змінень характеристик міцності та пластичності в залежності від ступеня деформації.

Для визначення розміру зерен і границь між зернами виготовляли шліфи, які підлягали поліровці і травленню. Протравлювач містить наступні компоненти: 50%  $\text{HNO}_3$ , 25%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  та 25%  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . Металографічний аналіз зразків з міді марки М1 проводили на мікроскопі «Neophot-32», фотографували елементи структури за допомогою фотокамери «Nikon Coolpix 2000».

### Результати експерименту та їх обговорення

У ході обробки мідної заготовки волочінням з крутінням в умовах зростання ступеня деформації за рахунок збільшення кількості обертів під час зміни напрямку обертання волок на протилежний відбувається неоднозначне формування механічних властивостей. А саме, лише така характеристика, як границя міцності, прямопропорційно залежить від ступеня деформації, чого неможна сказати про границю текучості і відносне звуження (рис. 1).

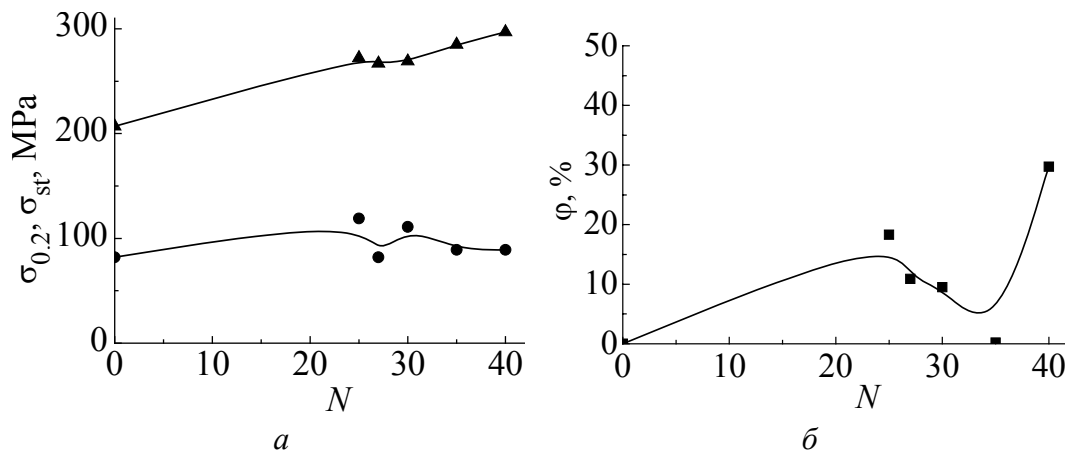


Рис. 1. Залежність границі текучості  $\sigma_{0.2}$ , границі міцності  $\sigma_{st}$  (а) та відносного звуження  $\psi$  (б) міді марки М1 від кількості обертів під час волочіння з крутінням:

● –  $\sigma_{0.2}$ , ▲ –  $\sigma_{st}$

У процесі крутіння в одному напрямку  $N_1/N_2 = 25/0$  границя текучості зростає, але під час зміни напрямку крутіння різко падає до вихідного недеформованого рівня. Як показав металографічний аналіз, це пов'язано з протіканням в об'ємі матеріалу процесів динамічної полігонізації та рекристалізації. Збільшення кількості обертів у ході зміни напрямку обертання волок на протилежний призводить до перетворення фрагментованої структури на структуру змішаного типу з фрагментованими та рекристалізованими

зернами (50% і 50% площі шліфу відповідно). Зерна повернуті відносно одне одного по поверхні границь зерен, що може свідчити про наявність міжзеренної деформації. Зафіксовано двійники і субграниці в об'ємі зерен. Подальше зростання ступеня деформації за рахунок збільшення кількості обертів під час відмотки супроводжується зміненням рекристалізованої структури на фрагментовано-рекристалізовану, тому доля площі, зайнятої фрагментованою структурою, зростає до 70%.

Дуже складна картина мікроструктури спостерігається між смугами ковзання, сформованими під кутом  $45^\circ$  до вісі деформації. В них утворюються скупчення великих рекристалізованих зерен (рис. 2), середній розмір яких складає  $20 \mu\text{m}$ , що може підтвердити протікання рекристалізації *in situ*.

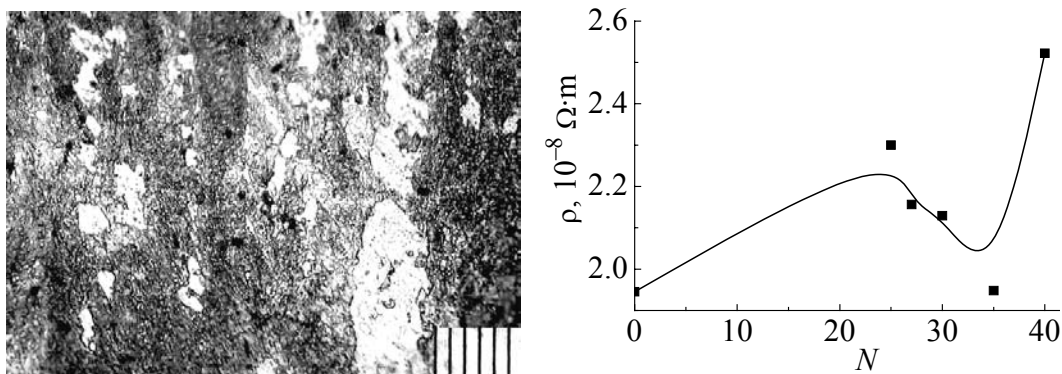


Рис. 2. Мікроструктура міді марки М1 під час волочіння з крутінням ( $N = 75 \text{ rev}$ ), ціна поділки  $10 \mu\text{m}$

Рис. 3. Зміна відносного електроопору міді марки М1 від кількості обертів під час волочіння з крутінням

В результаті дослідження поведінки електроопору після реалізації волочіння зі зміною напрямку обертання на протилежний встановлено, що така зміна зумовлює падіння значень електроопору (рис. 3) до рівня вихідного недеформованого стану ( $N = 35$ ). Як відомо [15], рекристалізація супроводжується зниженням електроопору до значень даного показника у вихідному недеформованому стані. Але відновлення деформації призводить до зростання електроопору внаслідок формування значної кількості дефектів ґратки [5,9].

### Висновки

Таким чином, деформування волочінням з крутінням в умовах введення додаткового змінення напрямку обертання на протилежний дозволяє отримати разом з підвищеними показниками міцності високі показники пластичності та електропровідності. Формування такого комплексу властивостей пояснюється розвитком процесу активної рекристалізації, яка приходить на зміну фрагментації. Тобто, зростання кількості обертів під час зміни знаку крутіння дозволяє обирати необхідні значення електроопору та пластичності в умовах збереження високих показників міцності.

Роботу виконано за фінансової підтримки конкурсного проекту Державного фонду фундаментальних досліджень України (ДФФД) і Російського фонду фундаментальних досліджень (РФФД) № Ф 28/443-2009 р. «Структурний стан і механічна поведінка наноструктурних металів і сплавів».

1. Деклараційний патент України UA 15030, МПК В21С1/02, В21F7/00, О.Г. Пашинська, В.М. Варюхін, І.І. Тищенко, Заявл. 28.11.05; Опубл. 15.06.06, Бюл. № 6.
2. О.Г. Пашинська, В.В. Пашинський, А.С. Домарева, І.І. Тищенко, МОМ № 4, 44 (2003).
3. Е.Г. Пашинская, В.Н. Варюхин, И.В. Лейрих, М.А. Антонова, И.И. Тищенко, В.М. Ткаченко, ФТВД **14**, № 4, 76 (2004).
4. Mirosław Wrobel, Stanisław Dymek, Marek Blicharski, Tomasz Moskalewicz, Met. i odlew. **26**, № 3, 153 (2000).
5. Е.Г. Пашинская, Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации, Вебер, Донецк (2009).
6. В.М. Фарбер, О.В. Селиванова, Металлы № 3, 45 (2003).
7. E.G. Pashinskaya, M.M. Myshlyaev, S.Yu. Mironov, V.N. Varyukhin, The Physics of Metals and Metallography **105**, № 1, 79 (2008).
8. G. Monnet, V. Vacroix, J.-L. Lebrun, T. Ungar, Met. Mater. Trans. **A33**, 591 (2002).
9. C.D. Liu, M.N. Bassim, Metall. Trans. **A24**, 361 (1993).
10. Catherine Cordier-Robert, Benoit Forfert, Bernard Bolle, Jean-Jacques Fundenberger, Albert Tidu, J. Mater. Sci. Full Set. 10.1007/s10853-007-2272-8 (2007).
11. Р.З. Валиев, Р.К. Исламгалиев, Н.Ф. Юнусова, МиТОМ № 2, 21 (2006).
12. А.Н. Тюменцев, М.В. Третьяк, Ю.П. Пинжсин, А.Д. Коротаев, Р.З. Валиев, Р.К. Исламгалиев, А.В. Корзников, ФММ **90**, № 5, 44 (2000).
13. А. Хензель, Т. Шпиттель, Расчет энергосиловых параметров в процессе обработки металлов давлением: Справочник, Металлургия, Москва (1982).
14. И.В. Лейрих, С.И. Марчук, С.В. Петрущак, Методические указания к лабораторным работам по курсу «Механические свойства и конструктивная прочность материалов», ДонНТУ, Донецк (2001), ч. 1.
15. Б.Г. Лившиц, Металлография, Металлургия, Москва (1990).

М.А. Кралоук, Е.Г. Пашинская, М.М. Мышляев, И.И. Тищенко

## ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДИ В УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИИ ВОЛОЧЕНИЕМ, СОВМЕЩЕННОЙ С КРУЧЕНИЕМ, ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ НА ПРОТИВОПОЛОЖНОЕ

Рассмотрено влияние структурообразования на формирование физико-механических свойств медной заготовки при холодной комбинированной пластической деформации со сдвигом (КПДС), которая заключается в волочении с кручением при изменении направления вращения на противоположное. Показаны нелинейные изменения физических и механических свойств вследствие конкурентного развития фрагментации и рекристаллизации.

**Ключевые слова:** медь, волочение, кручение, структура, свойства, комбинированная деформация

*M.A. Kralyuk, E.G. Pashinskaya, M.M. Myshlyaev, I.I. Tishchenko*

## FORMATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER UNDER DEFORMATION BY DRAWING COMBINED WITH TORSION WITH ROTATION DIRECTION CHANGE

Structurization effect on the formation of physical and mechanical properties of copper billet under a cold combined plastic deformation with shear (CPDS) consisting in drawing with torsion with the rotation direction change. Nonlinear changes of physical and mechanical properties are due to competing development of grain subdivision and recrystallization.

**Keywords:** copper, drawing, torsion, structure, properties, combined deformation

**Fig. 1.** Dependence of yield strength  $\sigma_{0.2}$  and ultimate strength  $\sigma_{st}$  ( $a$ ) as well as of relative necking  $\psi$  ( $\delta$ ) on the number of turns during drawing with torsion for copper of M1 quality:  $\bullet$  –  $\sigma_{0.2}$ ,  $\blacktriangle$  –  $\sigma_{st}$

**Fig. 2.** Microstructure of the M1-quality copper under drawing with torsion ( $N = 75$  rev), scale factor  $10 \mu\text{m}$

**Fig. 3.** Changes in resistivity of the M1-quality copper as a function of the number of turns under drawing with torsion