

Вплив термічної обробки деформованих зразків технічної міді на значення модуля Юнга

В. З. Куцова, доктор технічних наук, професор

Т. В. Котова, кандидат технічних наук

Г. П. Плошенко

Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ

Наведено результати досліджень впливу деформації з наступним відпалом на модуль пружності міді. Використовуючи модель ГЦК решітки з центральною взаємодією в першій координаційній сфері, були розраховані модулі пружності міді за отриманими рентгенодифракційними даними. Отримані значення модулів співставлені з існуючими даними. Показано, що модуль пружності істотно залежить від попередньої деформації і відпалів та є структурно чутливою характеристикою.

Для модулів пружності полікристалічних тіл характерні широкі межі розсіювання експериментальних значень, отриманих для одного і того ж матеріалу на зразках, що розрізняються за хімічним складом (по домішках), дефектності, ізотропності. Зведені дані про пружні постійні і модулі пружності міді обмежені за обсягом інформації і ступеню надійності [1].

В якості вихідного матеріалу використовували холоднокатану трубу ($\epsilon = 50\%$) діаметром $d = 23$ мм з технічної міді марки М1. Хімічний склад міді наведено в табл. 1. Зразки деформованої міді піддавали рекристалізаційному відпалу при температурі $T = 300$ °С і 400 °С, з витримкою 1 і 2 години, відповідно. Для визначення модуля пружності міді використовували метод [2], що дозволяє за відомими значеннями функції розподілу орієнтувань (ФРО) ефективно розрахувати значення модуля нормальної пружності.

Таблиця 1

Хімічний склад міді

Марка	Вміст елементів, % (по масі)									
	Fe	S	Ni	As	Pb	O	Sb	Bi	Sn	Cu
М1	0,50	0,01	0,20	0,01	0,01	0,005	0,30	0,002	0,05	99,70

Металографічні дослідження структури холоднодеформованої і відпаленої міді проводили з використанням мікроскопу марки «ColorView». Текстуру даних зразків вивчали за допомогою дифрактометра «MFDP». Розрахунки полюсних фігур (ПФ) і модулів пружності проводили за

допомогою програмного забезпечення MTEX-A MATLAB Toolbox Tutorial – Texture Analysis [3].

Властивості полікристалічних матеріалів істотним чином визначаються станом внутрішньої структури, зокрема, ФРО решіток зерен у представницькому обсязі (текстура) породжує анізотропію пружних і пластичних властивостей полікристалу і визначає експлуатаційні властивості виробу [4].

У деяких випадках однозначне розділення рекристалізованої і деформованої текстури є досить складним процесом. Однак, дана проблема пов'язана не стільки зі специфікою методу MFDP аналізу, скільки з недосконалістю сучасних уявлень про рекристалізацію чистих металів.

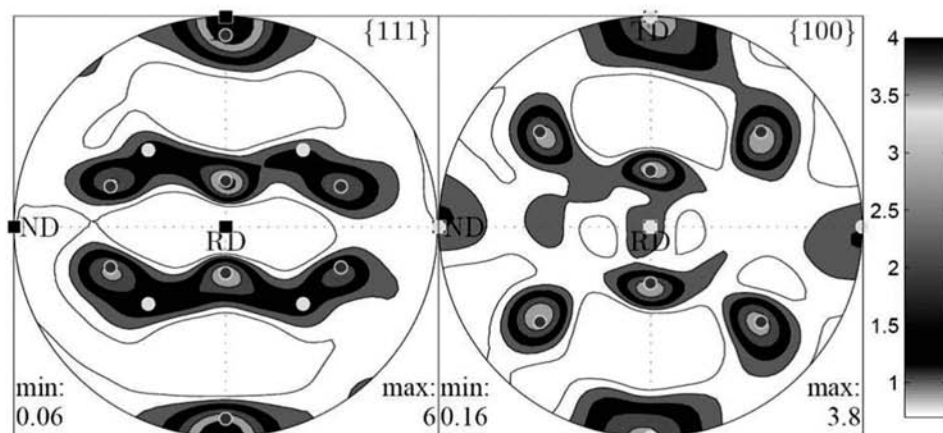
Текстура виникає в результаті спрямованого зовнішнього впливу, наприклад, в процесі деформації, при кристалізації в умовах значного градієнта температур, в магнітному або електричному полі, при конденсації з пари на підкладку. Текстури класифікують відповідно симетрії просторового розподілу орієнтувань зерен. У даній роботі була досліджена текстура прокатки і рекристалізації ГЦК металу.

Для аналізу механізму текстуроутворення міді використовували метод побудови ПФ. Пряма полюсна фігура (ППФ) – гномостереографічна проекція (ГСП) певної сукупності кристалографічних площин $\{hkl\}$ (стереографічних проекції нормалей $n\{hkl\}$ до цих площин) на обрану зовнішню площину для всіх кристалітів (зерен) даного полікристала. Положення точок ПФ визначається двома кутами α і β , де α – радіальна координата, що змінюється від 0 до 90°, β – азимутальна координата, що змінюється від 0 до 360° [5].

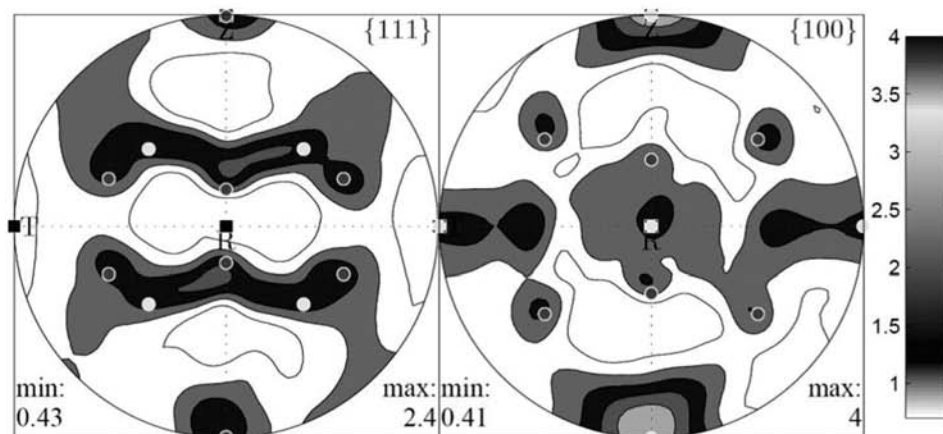
Для опису текстури, утвореної зернами з постійними і непостійними внутрішніми орієнтаціями, розраховані функції розподілу орієнтацій. Враховуючи симетрію ГЦК решітки міді і напрямок прокатки, ФРО були розраховані тільки для першого квадрата орієнтаційного простору. Отримані текстури прокатки (а) і рекристалізації (б, в) показані на рис. 1.

Відпал зразків при 300 °С призводить до значного послаблення орієнтувань (111) і (100): значення полюсної щільності знижуються від $P \langle 111 \rangle = 6,0$ до $P \langle 111 \rangle = 1,8$ і від $P \langle 100 \rangle = 3,8$ до $P \langle 100 \rangle = 1,5$ відповідно (рис. 1 а, в). Таким чином, найбільш сильно на інтенсивність текстури зразків міді впливає відпал протягом 1 години при температурі 300 °С.

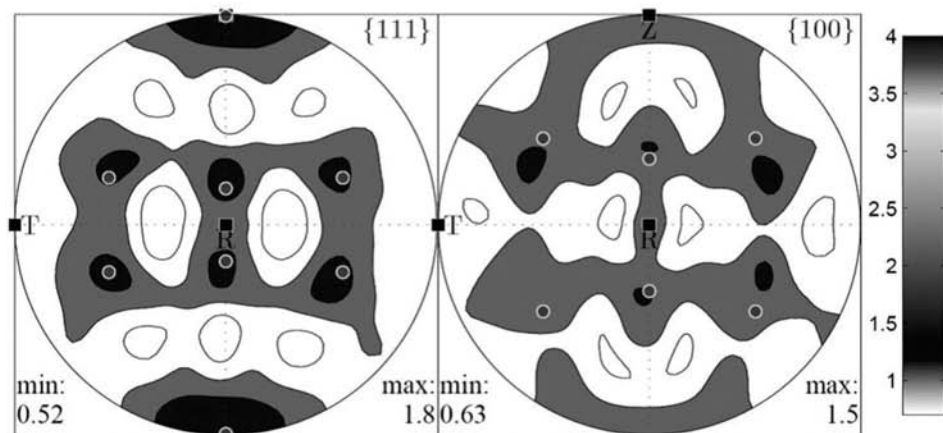
У процесі пластичної деформації і наступних термообробок, як правило, відбувається перерозподіл мікродомішок і мікродобавок, порушується ізотропність матеріалу, формуються переважаючі кристалографічні орієнтування – текстури [6], що викликають істотні зміни пружних модулів. Зміна модуля пружності, пов'язана з утворенням або руйнуванням переважних орієнтувань, може досягати десятків відсотків, причому значення модуля пружності полікристалічних матеріалів при наявності текстур залежать від напрямку, в якому вимірюється модуль. Значення модуля пружності також залежать від сили міжатомної взаємодії. При пластичній деформації зміна значень модуля пружності пов'язана зі



а



б



в

Рис. 1. ПФ (отримані MFDP аналізом) міді з даними про інтенсивність в площинах $\{111\}$ і $\{100\}$ деформованого зразка (а) і відпалених зразків при $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ години (б) та $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ година (в).

створенням викривлень в кристалічній решітці металу або сплаву і не перевищує 1 – 2 % [7]. Однак, з утворенням викривлень в кристалічній решітці металу при пластичній деформації зміни в структурі матеріалу не обмежуються.

Для того, щоб обчислити модуль пружності, необхідно знати тензор пружності монокристала і ФРО полікристалів. Використовуючи ПФ, представлені вище, були розраховані значення модулів пружності для прокатаного і відпалених зразків при температурах $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ з витримкою 2 години і 1 годину відповідно. Результати розрахунку показані на рис. 2 і в табл. 2.

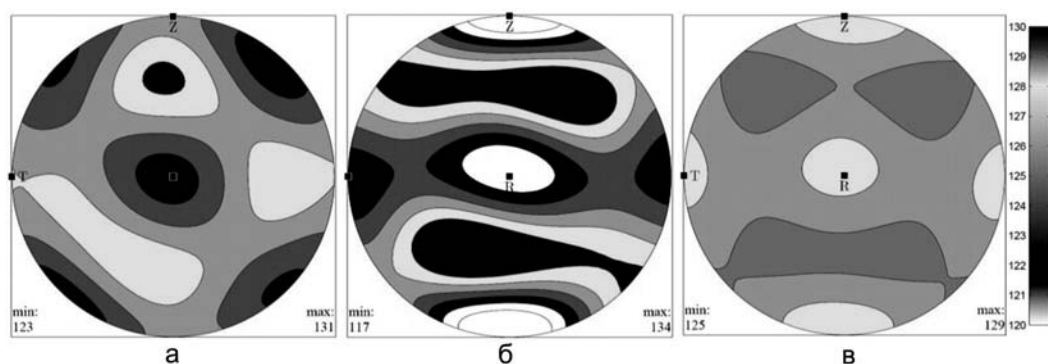


Рис. 2. ПФ для розрахунку модуля Юнга деформованого зразка (а) і відпалених зразків при $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ година (б) та $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2$ години (в).

Таблиця 2

Модуль Юнга зразків міді

Зразок	Стан зразка	E_{\min} , ГПа	E_{\max} , ГПа	E_z , ГПа
1	Деформація $\varepsilon = 50\%$	123	131	125
2	Відпал $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2$ години	125	129	128
3	Відпал $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1$ година	117	134	120

Дослідження показали, що Модуль Юнга не однаковий у всіх напрямках. Зразок 3 практично ізотропний (різниця між рівнями інтенсивності незначна – 125 і 129 ГПа). Це пов'язано з тим, що всі зерна рекристалізовані. Зміни модуля Юнга є більш важливими для зразка 2, який був нагрітий до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1 години.

З рис. 2 видно, що зразок 2 має нижчі значення модуля Юнга – 120 ГПа, в той час як зразки 1 і 3 мають модуль Юнга відповідно 125 і 128 ГПа.

Зміна модуля пружності, пов'язана з утворенням або усуненням переважних орієнтувань, може досягати десятків відсотків, причому значення модуля пружності полікристалічних матеріалів при наявності текстур залежать від напрямку, в якому вимірюється модуль.

Таким чином, модельовані значення модулів пружності не надто далекі за значеннями від теоретичних, що свідчить про успішне проведення експерименту.

Висновки Найявністю переважного орієнтування підсилює анізотропію властивостей матеріалу і може істотно змінити експлуатаційні характеристики виробу. Можливість утворення текстури слід враховувати при проведенні різних технологічних процесів.

Показано, що модуль Юнга по осі труби (Z-напрямок), максимально впливає на власні частоти труб. Зразок міді, відпалений при 400 °С, має низькі значення модуля Юнга – 120 ГПа, в той час як вихідний зразок і відпалений при 300 °С мають модуль Юнга відповідно 125 і 128 ГПа.

Зіставлення даних MFDP аналізу і розрахованих значень модулів Юнга свідчать, що в якості оптимального режиму термічної обробки може бути рекомендований відпал при 300 °С протягом 1 години.

У роботі також виконана перевірка використаного MFDP методу. Зокрема, розраховані модулі пружності чистої міді. Порівняння отриманих результатів з теоретичними даними показало, що розрахункові дані добре корелюють з теоретичними.

Література

1. Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: Справ. – Киев: Наук. думка, 1982. – 430 с.
2. Бардушкина И.В., Бардушкин В.В., Никитин А.Н. Использование системы matlab при моделировании напряженно-деформированного состояния // Труды II научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – 2002. – С. 68 – 74.
3. Bachmann F., Hielscher R., Schaeben H. Texture Analysis with MTEX – Free and Open Source Software Toolbox // Solid State Phenomena. – 2010. – 160. – P. 63 – 68.
4. Трусов П.В., Ашихмин В.Н., Швейкин А.И. Анализ деформирования ГЦК – металлов с использованием физической теории упругопластичности. – Пермь, 1987. – 54 с.
5. Иванов А.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. – М.: Металлургия, 2009. – 388 с.
6. Duggan B.J., Lfieke K., K6hlhoff G. Studies of annealing in cold rolled copper // Int. Conf. on Recrystallization and Related Phenomena. – 1992, Trans Tech Publications, Materials Science Forum 113-115, (1992). – 2003. – 6. – P. 121 – 126.
7. Сытин В.И., Воеводин В.Н., Шевченко С.В. Изменение модуля нормальной упругости меди в зависимости от направлений деформации // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2005. – 84. – С. 32 – 35.

Одержано 25.02.14

В. З. Куцова, Т. В. Котова, А. П. Плошенко

**Влияние термической обработки деформированных образцов
технической меди на значения модуля Юнга**

Резюме

Приведены результаты исследований влияния деформации с последующим отжигом на модуль упругости меди. Используя модель ГЦК решетки с центральным взаимодействием в первой координационной сфере, по известным рентгенодифракционным данным были оценены модули упругости меди. Полученные значения модулей сопоставлены с существующими данными. Показано, что модуль упругости существенно зависит от предварительной деформации и отжигов, и является структурно чувствительной характеристикой.

V. Z. Kutsova, T. V. Kotova, G. P. Ploshenko

**Influence of heat treatment of technical copper samples
on the Young's modulus**

Summary

The effect of deformation and annealing on the elastic modulus of copper was shown in this study. Using the model of the fcc lattice with central interaction in the first coordination sphere and also the known X-ray data elastic modulus of copper were calculated. The resulting magnitudes were compared to existing data. The elastic modulus strongly depends from the pre-deformation and annealing and also it is structurally sensitive characteristic of material.

Шановні колеги!

**Триває передплата на науково-технічний журнал
«Металознавство та обробка металів» на 2015 р.**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України. Вартість одного номера журналу – 30 грн., передплата на рік – 120 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2013 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.

Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,

з посиланням на журнал "ММ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.