

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-163>

STUDY OF PLASTIC DEFORMATION OF COPPER UNDER CONDITIONS OF INTENSIVE COMBINED LOADING

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МІДІ В УМОВАХ ІНТЕНСИВНОГО КОМБІНОВАНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Pashynska O.G.

*DSc (Engineering), Senior researcher,
LLC “Technical university
“Metinvest polytechnic”, Zaporizhzhia;
E.O. Paton Electric Welding Institute,
Kyiv, Ukraine*

Пашинська О.Г.

*д.т.н., старший науковий
співробітник, ТОВ «Технічний
університет «Метінвест
політехніка», м. Запоріжжя;
Інститут електрозварювання
імені С.О. Патона Національної
академії наук України,
м. Київ, Україна*

Boiko I.O.

*PhD (Engineering),
Associate Professor, LLC “Technical
university “Metinvest polytechnic”,
Zaporizhzhia, Ukraine*

Бойко І.О.

*к.т.н., доцент,
ТОВ «Технічний університет
«Метінвест політехніка»,
м. Запоріжжя, Україна*

Zavdoviciiev A.V.

*PhD, Researcher,
E.O. Paton Electric Welding Institute,
Kyiv, Ukraine*

Завдовєєв А.В.

*к.ф.-м.н., науковий співробітник,
Інститут електрозварювання
імені С.О. Патона Національної
академії наук України,
м. Київ, Україна*

Kraliuk M.A.

*PhD (Engineering), Researcher,
Odesa Research Institute
of Forensic Science of the Ministry
of Justice of Ukraine,
Odesa, Ukraine*

Кралоук М.А.

*к.т.н., науковий співробітник,
Одеський науково-дослідний
інститут судових експертиз
Міністерства юстиції України,
м. Одеса, Україна*

У великій кількості робіт [1, 2, 3] показано, що інтенсивна пластична деформація (ПД), побудована на поєднанні різних видів навантаження, впливає на розбудову структури на мікро-, мезо- та макромасштабному рівні. У роботах [3, 4] як механізм формування ультрадрібнозернистої

структури обговорюється як дифузійний (пов'язаний з генерацією та рухом міжвузельних атомів), так і бездифузійний масоперенос речовини. Передбачається, що ПД призводить до накопичення великої кількості нерівноважних вакансій та їх взаємодії з дислокаціями, що рухаються. Однак, у літературі відсутні детальні дослідження самої пластичної деформації при комбінованих схемах навантаження в рамках підходів нерівноважної термодинаміки, хоча перебудова структури при ПД відбувається в нерівноважних умовах. Ці дані можуть бути важливими для розуміння багатьох особливостей поведінки матеріалів при комбінуванні крутіння-розтягування, а також крутіння-стиснення.

У цій роботі проведено теоретичне вивчення процесів накопичення дефектів в умовах інтенсивної комбінованої деформації крученням та розтягуванням при постійному навантаженні методами молекулярної термодинаміки. Інтенсивна пластична деформація (ПД) металів характерна текстурними та структурними перетвореннями. Важливим чинником, що впливає характер таких перетворень є узгодженість орієнтацій діючих зусиль і напруг щодо напрямів елементів симетрії кристалічної структури. Будь-який новий вид навантаження відкриває додаткові канали ПД дає можливість управляти процесом ПД. У цій роботі за допомогою комп'ютерного експерименту розглянуто один із видів такого навантаження.

Відомо, що при витягуванні проволочки формується переважно текстура $\langle 111 \rangle$. Тому як об'єкт досліджень виберемо вільний гексагональний кристаліт прямокутного перерізу, в якому кулі максимальної упаковки чергуються по висоті (рис. 1). Число частинок у X-орієнтованої цепочки дорівнює 10, число таких ланцюжків у кожному перерізі також дорівнює 10. Загальна кількість шарів дорівнює 25. Верхня і нижня грані рухаються як жорстке тверде тіло за заданим законом, зумовлюючи перебудову внутрішніх атомів стрижня. Частинки зразка взаємодіють між собою за допомогою парного потенціалу Леннарда-Джонса [2]:

$$U_{ijkl} = E_b \left(\left(\frac{r_0}{r_{ijkl}} \right)^{12} - \left(\frac{r_0}{r_{ijkl}} \right)^6 \right) \quad (1)$$

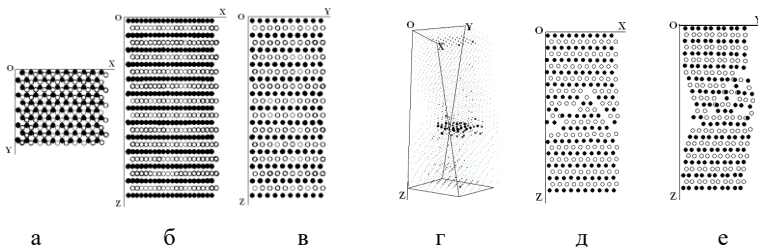
де $r_{ijkl} = \sqrt{(X_{ij} - X_{lk})^2 + (Y_{ij} - Y_{lk})^2}$ – відстань між частинками номерів i, j і l, k з декартовими координатами X_{ij}, Y_{ij} і X_{lk}, Y_{lk} . Індекси i, l нумерують атоми у ґратці вздовж Y – напрямку, j, k – вздовж X – напрямку. E_b, r_0 – енергія зв'язку та рівноважна відстань між частинками у двоатомній системі. Постійні, що входять до виразів потенціалу (1) і маса частинок в редукованій системі одиниць вибрані

рівними $E_b = 0.20833 \text{ мДжс}_r$, $r_0 = 1 \text{ м}_r$ и $m = 0.01 \text{ кг}_r$, а крок часу обраний рівним $\Delta t = 0.18 \text{ с}_r$.

На першій стадії протягом перших 500 часових кроків верхня та нижня грані зразка закручуються у взаємозворотних напрямках з однаковою протягом одного комп'ютерного експерименту швидкістю. Перший контрольний комп'ютерний експеримент здійснювався без початкового закручування. У кожному наступному комп'ютерному експерименті швидкість кута закручування збільшувалася на величину 0.016 град/с_r .

В результаті експерименту було отримано серію зразків, які відрізнялися між собою лише значенням початкового кута закручування. Подальше їх деформування здійснювалося розтягуванням уздовж вертикальної осі за рахунок руху верхньої та нижньої граней у взаємно протилежних напрямках із постійною швидкістю $0.0005556 \text{ м}_r/\text{с}_r$.

Приклад еволюції атомної структури наведено на рис. 1 г, д, е. (темніші кружечки відповідають великим значенням потенційної енергії атомів). У центрі атомної структури утворилася зона підвищеної потенційної енергії. Показано, що деформування розтягуванням заздалегідь закрученого зразка призводить до еволюції атомної структури кристала, причому спостерігається не тільки зміщення атомів щодо осей XYZ, а й формування вакансій і вакансійних скупчень. З XZ-проекції чітко видно область зсувних рухів атомних шарів за механізмом крайових дислокацій, що характерно для релаксації напружень, що розтягують. Розрахунки показали зменшення величини кінетичної енергії кристала зі збільшенням кута закручування, що позначиться лише на рівні макровластивостей зразка. У реальному експерименті при закручуванні має спостерігатися полегшена пластична течія при навантаженні, що розтягує.



У вихідному стані: а, б, в – XY, XZ, YZ – проекції відповідно
Після закручування: г, д, е – XY, XZ, YZ – проекції відповідно

Рис. 1. Просторове розташування атомів зразка

Цей висновок підтверджується у реальному експерименті [4]. Натурні експерименти з кручення та розтягування мідного дроту в умовах ідентичних комп'ютерному експерименту показали картину деформації, що якісно збігається з модельним експериментом. Встановлено, що при створенні комбінованого напруженого стану наявність дотичних напруг полегшує процес пластичного перебігу під дією нормальних напруг і напруга поздовжнього пластичного перебігу знижується у 2–5 разів [4]. Це явище може бути використане для підвищення деформованості металів при розробці ефективних схем пластичної обробки металів.

Автори висловлюють подяку Метлову Л.С. за допомогу у постановці експерименту та плідне обговорення результатів.

Перелік використаних джерел

1. Хоменко А. В. Висока пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. Т. 24 (№2), стр. 2001-1 – 2001-20.
2. Metlov L.S. Evolution of Metal Structure at Intense Plastic Strains: Molecular Dynamics Simulation. *Materials Science*, 7 may 2003, 10 p.
3. Zavadovcev A., Baudin T., Rogante M., Pashynska E., Skoryk M. Shear impact during steel wire drawing on grain bound, aries and mechanical properties. *Letters on materials*, 2020, 10(4s) 558-565. <https://lettersonmaterials.com/en/Readers/Article.aspx?aid=35968>.
4. Pashynska O., Pashynskiy V., Kraliuk M., Boyko I. Forming of properties complex of copper wire by the method of combined deformation by torsion and tension. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(1(63)), pp.16-22.2022.