

**СКРИТА ЕНЕРГІЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЩЕННЯ
ТЕЛУРУ ПРИ α -КОВЗАННІ**

Експериментально досліджена скрита енергія пластичної деформації телуру при α -ковзанні. Показано, що вирішальну роль в енергії, яка запаслася деформованими кристалами Те, відіграють задержані дислокації. Вклад точкових дефектів не перевищує 1%. Відношення енергії, яка запасається до роботи деформацій узгоджується на стадії параболічного зміщення із зміною коефіцієнта зміщення.

Телур - елементарний напівпровідник, гексагональна структура якого побудована на гелікоїдальних атомних ланцюжках, упакованих паралельно вісі С. Енергія зв'язку між атомами всередині ланцюжків набагато вища енергії зв'язку між ланцюжками [1]. Сильна анізотропія хімічного зв'язку приводить до того, що при однорідному напруженому стані єдиною площиною ковзання в Те є призматична площина першого роду $\{10\bar{1}0\}$ з напрямками ковзання (векторами Бюргерса) $a=1/3 \langle\bar{1}210\rangle$ або $c = \langle 0001 \rangle$ [2-6].

Характерною особливістю пластичної деформації телуру є сильна температурна залежність границі пружності в області низьких температур, яка у випадку α -ковзання пов'язується з термічно активованим подоланням сил Пайерлса-Набарро [7]. Особливістю кривих зміщення кристалів Те є наявність протяжної стадії мікропластичної деформації, що зв'язано з рухом гвинтових дислокацій. Це приводить до параболічної форми кривих коефіцієнта зміщення при малих деформаціях без чітко вираженого переходу від мікро до макропластичності [3].

Дислокаційні механізми, що визначають деформаційне зміщення кристалів Те, повинні відрізнятися певною специфікою. В

зв'язку з цим є цікавим дослідження енергії пластичної деформації даних кристалів, яка безпосередньо зв'язана з кінетикою розмноження дислокацій і накопиченням залишкових дефектів.

Методика дослідження

Для досліджень використовувались монокристали високо-чистого телуру з густиною дислокацій не більше 10^6 см⁻². Монокристали вирощувались методом Чохральського з напрямком росту перпендикулярно гексагональній вісі. Зразки у вигляді прямокутних паралелепіпедів $3 \times 4 \times 10$ мм³ вирізались із монокристалічного злитку при допомозі емульсійної різки і піддавались механічній і хімічній поліровці ($\text{CrO}_3 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1:1:2$)

Зразки деформували стисненням із швидкістю 10^{-5} м/с вздовж довшої площини, яка була орієнтована паралельно напрямку \vec{a} . Деформацію проводили при кімнатній температурі в калориметричні приставці до дослідної машини "Instran-ТТDM". При вибраній орієнтації в кристалах Те реалізується ковзання а-типу з мінімальною межею пружності, що дорівнює 50 г/мм² [3].

Енергію E_s , яка запасасться при пластичній деформації, визначали на основі енергетичного балансу даного процесу $W = Q + E_s$, де W - затрачена на деформацію механічна робота, Q - енергія, яка виділяється в зразку у вигляді тепла.

Робота W розраховувалась як площа над кривою залежності деформації від навантаження з помилкою, яка не перевищує 5%. Зразки піддавались періодичному навантаженню (з послідуочим розвантаженням) зусиллям P , величина якого поступово зростала.

Повну енергію, що запасасться при даній деформації одержували шляхом сумування окремих приростів ΔE_s . Відносна помилка величин E_s складала біля 10% при великих деформаціях. Представлені значення E_s є середніми результатами вимірювань на п'яти зразках однієї орієнтації.

Результати вимірювань та їх обговорення

Діаграма стиску досліджуваних кристалів показана на рис.1 (крива 1). Вона добре узгоджується з діаграмою одержаною в [3].

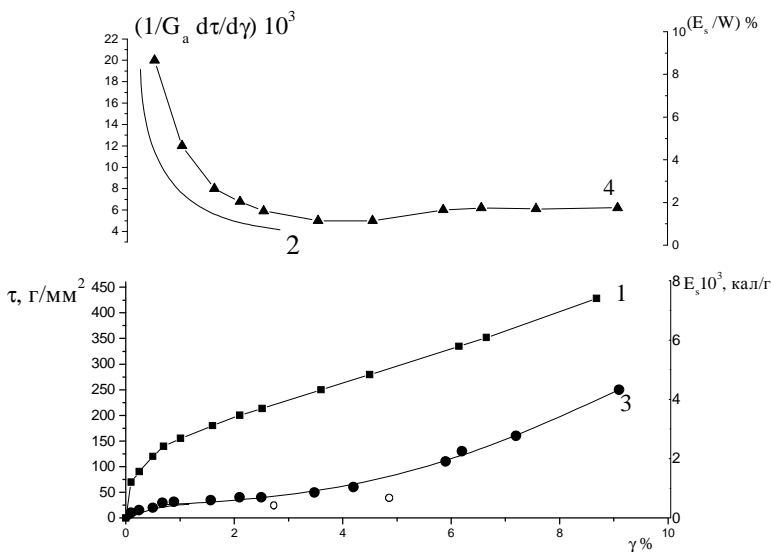


Рис.1. Стиск кристалів Те при кімнатній температурі (а-ковзання)

1-діаграма стиску $\tau(\gamma)$; 2-коефіцієнт зміщення $\Theta = \frac{1}{Ga} \frac{d\tau}{d\gamma}$;

3-енергія, що запасасться; 4-відношення E_s / W ;

о-оцінка енергії дислокацій E_s^d при $R^* = N^{-1/2}$.

На діаграмі стиску лінійній залежності коефіцієнта зміщення $\theta = \frac{1}{6a} \frac{dz}{dg} \approx 3,5 \times 10^{-3}$ передує плавний параболічний перехід від

пружної деформації (границя пружності $\tau_p \approx 50$ г/мм² з постійним зменшенням коефіцієнта зміщення (крива 2) (в даному випадку $G_a = C_s = 1300$ кг/мм - модуль зсуву для системи ковзання а-типу [9]). Границя параболічної стадії відповідає деформації $\gamma = 0,8\%$.

Електронно-мікроскопічні дослідження слабдеформованих зразків ($\gamma = 2,6\%$) виявили систему одиничних взаємодіючих дислокацій із середньою густиною $(1-5) \cdot 10^{-8}$ см². Практично всі дислокації мають вектор Бюргерса а-типу, але на відміну від

встановленого в роботі [5] більшість дислокацій не володіє чисто краєвою орієнтацією. Однак спостерігається тенденція до впорядкування дислокаційних ліній вздовж гексагональної вісі С. Залежність енергії, що запасасться деформованими кристалами телуру від величини приведеної деформації показана кривою 3. Як видно із рис.1, в межах зміни деформації від 0 до 3% величина E_s спочатку зростає ($\gamma < 1\%$) потім майже не залежить від γ і в подальшому знову помітно зростає, без спостереження тенденції до насичення, при збільшенні γ до 10%.

Відношення E_s / W крива 4 близьке до 100% в області мікропластичності різко понижуються з збільшенням деформації і на стадії лінійного зміцнення складає 20-40%. Зміна відношення E_s / W корелює з зміною коефіцієнта зміцнення (крива 2 і 4).

На рис.2 представлена залежність скритої енергії пластичної деформації телуру як функція квадрату прикладеної напруги.

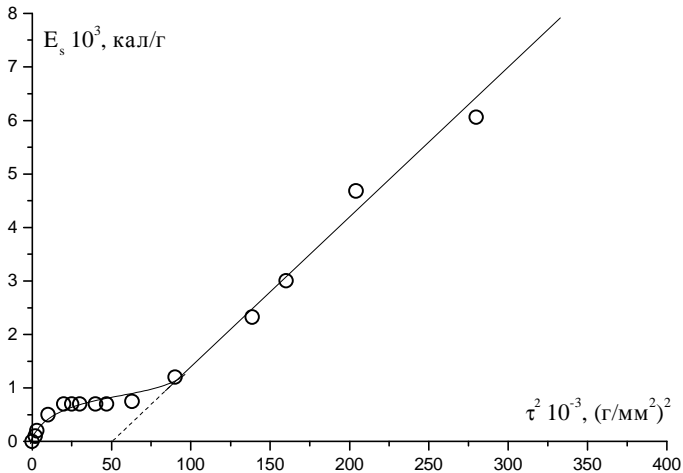


Рис.2. Залежність скритої енергії пластичної деформації від прикладеної напруги в координатах $E_s=f(\tau^2)$.

На відміну від гранецентрованих кристалів NaCl, MgO, та металів лінійне співвідношення між E_s і τ^2 в телури не є універсальним. Дане співвідношення проявляє універсальність при деформаціях вище 4%, коли починається інтенсивне а-ковзання по вторинній системі. Відомо, що лінійне співвідношення між E_s і τ^2 повинно виконуватись в тому випадку, якщо "власна" енергія одиниці довжини дислокації $\epsilon(N) \sim Gb^2$, практично постійна, а опір деформуванню визначається взаємодією між дислокаціями, тобто коли $\tau = \alpha GbN^{1/2}$ (N - густина дислокацій, α - постійний коефіцієнт). Хоча умова $\tau = \alpha GbN^{1/2}$ ($\alpha = 0,2$) для телуру на лінійній стадії зміцнення приблизно виконується [5] наявні дані [7] свідчать про те, що навіть при кімнатній температурі поряд з міждислокаційною взаємодією суттєву роль в терті рухомих дислокацій відіграють сили Пайерлса (взаємодія з кристалічною ґраткою). Особливістю дислокаційної структури телуру на самих початкових стадіях деформації при а-ковзанні є накопичення довгих крайових дислокацій, які створюють далекодіючі поля пружних напруг. В результаті релаксаційних процесів пружна енергія деформованого кристалу знижується. Ці процеси, мабуть, приводять до зміни співвідношення між E_s і τ^2 рис.2, а також суттєве зменшення з ростом деформації коефіцієнта зміцнення θ і частини зовнішньої роботи, що переходить в пружну енергію. До початку лінійної стадії зміцнення (макроскопічної текучості) густина дислокацій по всьому кристалу (при початковому значенні густини $\approx 10^6$ см⁻²) досягає значення $N = 5 \cdot 10^2$ см⁻² при $g = 2,6\%$ і $N = 10^2$ см⁻² при $\gamma = 4,6\%$. Очікуваний вклад енергії дислокації E_s^d в скриту енергію деформування кристалу телуру показано на рис.1 незамальованими кружками. При визначенні величини E_s^d розподіл дислокацій рахується рівноважним, а зовнішній радіус пружного поля дислокації в формулі для власної енергії дислокації $\epsilon(N) = \frac{kb^2}{4\pi} \ln(R^*/r_0)$, приймався рівним $R \approx N^{-1/2}$, внутрішній

радіус оцінювався як $r_0 = |b|/4$, $|b| = 4,447 \cdot 10^{-8}$ см, енергетичний множник kb^2 для а-дислокацій в телурі теоретично розрахований в роботі [4,10]. Виявилось, що цей множник слабо залежить від орієнтації лінії дислокації відносно вектора Бюргерса і дорівнює $28 \cdot 10^{-5}$ ерг/см. Із рис.1 видно, що розраховане значення E_s^d відрізняється від експериментального не більше ніж в два рази. Ця різниця можлива, якщо допустити, що в телурі вже на стадії лінійного зміцнення зберігаються нерелаксовані ґратки первинних дислокацій.

Згідно [6], в телурі загальна густина сходинок на дислокаціях і точкових дефектах при деформації $\gamma = 9\%$ не перевищує 10^{16} см⁻³. Допускаючи енергію утворення точкових дефектів рівною $U_b = 0,1 \text{Gb}^3$ [11] одержимо, що повний вклад точкових дефектів в енергію, що запасається при $\gamma = 9\%$ рівний $0,6 \cdot 10^{-4}$ кал/г, що становить $\sim 1\%$ від експериментального значення E_s .

Таким чином, як в випадку ГЦК енергія накопичення дислокацій відіграє домінуючу роль в скритій енергії пластичної деформації кристалів телуру. Вимірювання скритої енергії пластичної деформації якісно відображає особливість деформаційного зміцнення телуру при а-ковзанні, зв'язаного з накопиченням на початковій стадії деформації груп первинних дислокацій крайового типу, які закріплені в їх площинах ковзання завдяки високим бар'єрам Пайерлса.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чижиков М., Счастливый В. Теллур и теллуриды.-М.:Наука, 1972.-640с.
2. Ortenberg N. Cyclotron Resonance in Plastically Deformed Tellurium//Phys.Stat.Sol (b)-1973-60,p531-537.
3. Persio J., Doukhan J.C., Saada G. Dislocations in structure tellurium // J.Physique.-1967.-N28.-P.661.
4. Persio J. Doukhan J.C., Saada G. Deformation plastique du tellur

- monocrystallin // Phys.Stat.Sol.-1970.-N42.-P.281-297.
5. Doukhan J.C. and Esceig B. Elastic limit and Peierls Forces in Tellurium Single Crystals // Phys.Stat.Sol (a).-1971.-N7.-P.441.
 6. Defect-Induced Optical Absorption near the Electronic Band Edge of Tellurium / Alpen U., Doukhan J.C., Esceig B., Grosse P. // Phys. Stat. Sol (b).-1973.-N55.-P.667.
 7. The Thermally Activated Deformation of Tellurium Single Crystals / Crampon J., Doukhan J.C., Esceig B., Forvacque J.L. // Phys.Stat. Sol(a).-1974.-N24.-P.167.
 8. Солончук Л.С. Некоторые особенности электрических и фотоэлектрических свойств монокристаллов теллура: Дис....канд. физ.-мат. наук.-Черновцы, 1993.
 9. Observation of Dislocations in Tellurium by Transmission Electron Microscopy / Doukhan J.C., Doukhan N., Saada O., Thomas B. // Phys.Stat.Sol.-1969.-N35.-P.835.
 10. Plastic deformation and influence of a-dislocations on mobility of holes in pure Te single crystals / Crampon J., Doukhan J.C., Forvacque J.L., Gerlach E., Grosse P. // Inst.Phys.Conf Ser.No-1975-25-Chapter6.-P.415.
 11. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций.-М.: Атомиздат, 1972.

SUMMARY

GUTAROV E.I., SOLONCHUK L.S.,
SOLONCHUK I.L., KHOMIAK V.V.

HIDDEN ENERGY OF DEFORMATION SHIFT IN TELLURIUM DURING a-SLIDING

By means of deformational calorimetry hidden energy of plastic deformation in tellurium was investigated. It was shown that the energy of detained dislocation is of the main role in energy accumulated by deformed crystals. Contribution of point defects is not more than 1%. The ratio of hidden energy to deformation work conforms at the parabolic strengthening stage with the change of strengthening coefficient.