

PACS numbers: 61.72.Nh, 61.72.Lk, 62.20.dj, 62.40.+i, 81.40.Gh, 81.40.Jj, 81.70.Bt

Еволюція дефектних підсистем в ауксетичному берилії в процесі деформації

О. Ю. Тащук, М. К. Мишилюк, М. Д. Раранський,
А. В. Олійнич-Лисюк

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2,
50012 Чернівці, Україна*

В роботі методом низькочастотного внутрішнього тертя досліджено еволюцію дефектних підсистем і внесок Пуассонових коефіцієнтів у процес мікропластичної деформації ауксетичного берилію зі зміною температури і амплітуди деформації. Математично змодельовано швидкості руху дефектів у берилії в різних температурних областях, які охоплюють ауксетичні і неауксетичні стани. У межах дислокаційно-дисклінаційного моделю оцінено відношення швидкостей руху дефектів V/V_0 , параметри гальмування B_i та енергії активації E_i в берилії у широкому інтервалі температур. Показано, що теоретично оцінені величини добре збігаються з експериментально визначеними.

Ключові слова: низькочастотне внутрішнє тертя, амплітудно-температурні залежності, мікропластична деформація, швидкість руху дислокацій, ауксетичність, Пуассонів коефіцієнт.

В работе методом низкочастотного внутреннего трения исследованы эволюция дефектных подсистем и вклад коэффициентов Пуассона в процесс микропластической деформации ауксетического бериллия с изменением температуры и амплитуды деформации. Математически смоделированы скорости движения дефектов в бериллии в разных температурных областях, включающих ауксетические и неауксетические области. В рамках

Corresponding author: Alla Vasylyvna Oliynych-Lysyuk
E-mail: a_oliynich@ukr.net

*Yurii Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynsky Str., 50012 Chernivtsi, Ukraine*

O. Yu. Tashchuk, M. K. Myshylyuk, A. V. Oliynych-Lysyuk, and M. D. Rarans'ky,
Evolution of Defect Subsystems During Microplastic Deformation of Auxetic Beryllium,
Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 37, No. 12: 1595–1602 (2015) (in Ukrainian).

дислокационно-дисклинационной модели сделаны оценки отношения скоростей движения дефектов V/V_0 , параметров торможения B_i и энергий активации E_i в бериллии в широком интервале температур. Показано, что теоретические оценки хорошо согласуются с экспериментально измеренными величинами.

Ключевые слова: низкочастотное внутреннее трение, амплитудно-температурные зависимости, микропластическая деформация, скорость движения дислокации, ауксетичность, коэффициент Пуассона.

In this article, the evolution of defect subsystems and the contribution of Poisson's ratios in the process of microplastic deformation of auxetic beryllium with the change of temperature and strain amplitude are investigated by means of the method of low-frequency internal friction (LFIF). The velocities of defects in the beryllium are mathematically modelled in different temperature intervals, which include the auxetic and non-auxetic material states. The relations of motion rates of defects, V/V_0 , parameters of slowing-down, B_i , and activation energies, E_i in beryllium are calculated within the scope of the dislocation–disclination model in a wide temperature range. As shown, theoretically evaluated values well agree with experimentally obtained ones.

Key words: low-frequency internal friction, amplitude and temperature dependences, microplastic deformation, velocity of dislocation, auxetic effect, Poisson's ratio.

(Отримано 17 вересня 2015 р.)

1. ВСТУП

Активні дослідження матеріалів з від'ємними коефіцієнтами Пуассона (ауксетиків) показали, що явище це доволі поширене як серед елементарних кристалів, так і серед хемічних з'єднань і композитів. Ауксетики — структури, які здатні розширюватись/звужуватись в напрямку перпендикулярному до їх розтягу/стиску, володіють яскравими нелінійними деформаційними властивостями і тому приваблюють матеріалознавців-практиків. У цьому плані дослідження частково ауксетичних матеріалів, властивості яких сильно змінюються залежно від напрямку в кристалі та від стану і динамічних властивостей їх дефектних підсистем, є найменш вивченими і особливо актуальними. Берилій (відомий конструкційний матеріал, який широко використовується в атомній та аерокосмічній галузях промисловости) є частковим ауксетиком — матеріалом, якому в різних температурних областях притаманний різний тип ауксетичности [1]. Водночас пластичні властивості берилію далекі від ідеальних — проблема низькотемпературної крихкості берилію ще не вирішена. Процес деформації берилію при низьких температурах відбувається за рахунок одночасного руху двійників і дислокацій різного типу [2], і зміна знаку коефіцієнтів Пуассона не може

не впливати на їх динамічні характеристики, а отже і на структурно чутливі властивості кристалів, такі як низькочастотне внутрішнє тертя (НЧВТ) чи динамічні модулі пружності.

Тому цю роботу присвячено дослідженню механізмів і закономірностей впливу ауксетичних властивостей берилію на еволюцію його дефектних підсистем на початкових стадіях мікропластичної деформації (МПД) методом НЧВТ.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Мікропластична деформація гексагональних металів при відносно низьких температурах (атермічна деформація) відбувається за рахунок одночасного ковзання дислокацій і двійникування. Дослідження цих процесів у металах зустрічається з певними методичними складнощами не тільки через непрозорість матеріалу, але і через те, що в металах двійникуванню, як правило, передують ковзання, яке на всіх подальших етапах розвитку двійника супроводжує його. Деформація ковзанням сильно спотворює вихідну структуру кристалу і не дозволяє забезпечити локальну ідентичність умов розвитку двох, не кажучи вже про більше число, двійникових прошарків у межах одного і того ж зразка, навіть при найретельнішому збереженні всіх інших умов експерименту [2].

Механічне двійникування як і ковзання, здійснюється шляхом генерування та переміщення дислокацій. Кожна двійникова дислокація, рухаючись під дією механічних напружень, перебудовує моноатомовий шар кристалу в двійникову орієнтацію. Однак, незважаючи на спільність дислокаційних механізмів розвитку, двійникування і ковзання істотно відрізняються одне від одного за характером прояву. Так, наприклад, при двійникуванні вся деформація локалізована на двійникових межах поділу; двійникові дислокації зароджуються і переміщуються в кристалі у вигляді великих скупчень, що утворюють двійникові межі; вихід двійникових дислокацій з кристалу утруднений, внаслідок чого відбувається зростання їх щільності на межах поділу і, як наслідок, виникають потужні внутрішні напруження. Ці напруження мають орієнтований характер і гальмують подальше зростання здвійникованих об'ємів, і можуть стати перешкодами для руху дислокацій. Тому двійникування має значно більшу схожість з такими процесами як утворення тріщин і мартенситних голок, ніж з ковзанням, тобто належить до особливих структурних перетворень. Вказане структурне перетворення принципово відрізняється від термодинамічного структурного фазового переходу і повинно описуватися на основі нерівноважної термодинаміки [3].

При накладанні знакозмінної деформації двійникування може відбуватися як в прямому, так і в зворотньому напрямках; тому ро-

зрізняють два види зворотності деформації: пружню і пластичну. Пружня зворотність є невід'ємним етапом розвитку механічного двійника і полягає в повному чи частковому роздвійникуванні кристалу під дією внутрішніх напружень після зняття зовнішнього навантаження [4]. Пластична зворотність виявляється при деформуванні зразків зовнішніми механічними напруженнями оберненого знаку [2]. Перший вид зворотності деформації визначає гістерезу і внутрішнє тертя на межах двійників, другий — робить внесок у Баушингерове явище при знакозмінному навантаженні кристалів.

За кімнатної температури в берилії реалізуються дві системи ковзання: легкого первинного в системах $(0001)[11\bar{2}0]$ і важчого вторинного в системах $(1\bar{1}00)[11\bar{2}0]$. Вторинне ковзання характеризується більш високою межею плинності. Якщо за певних умов деформації на легке базисне ковзання накладається орієнтаційна заборона, то пластична деформація двійникуванням здійснюється в системах $(10\bar{1}2)[1011]$ і ковзанням у вторинних системах $(1\bar{1}00)[11\bar{2}0]$ [2].

Наші зразки є текстуровані полікристали з осями c , орієнтованими перпендикулярно до головної осі зразка, тому зовнішні механічні напруження були перпендикулярними до площини (0001) . Ми припустили, що гвинтові, крайові і двійникові дислокації роблять рівноймовірний внесок у процес МПД у берилії, тому швидкість деформації розглядали як результат адитивного внеску дефективучасників. Швидкість руху дислокацій описували за формулою (1), запозиченою в [4]:

$$v = j(\tau^*/\tau)^n \exp[-\Delta U/kT], \quad (1)$$

де $j = ln$ — пробіг дислокації, $\tau = 0,98 \cdot 10^{-4}$, $\tau^* = \alpha_i G b \rho^{1/2}$ — ефективні напруження, що діють на дислокацію, $\alpha_k = \pi(1 - \nu)/2$, $\alpha_h = \pi/2$ — коефіцієнти для крайової і гвинтової дислокацій відповідно, $\Delta q = -\gamma\tau^*$, $\Delta U = 2\gamma\tau^*$ — енергія активації ковзання дислокації, n в показнику степеня може змінюватись від нуля до декількох десятків. А швидкість руху двійників оцінювали за формулою (2), запропонованою в роботі [2] для клинуватих двійників:

$$v = v_{dv}^m \exp\left[-\frac{\Delta q - \gamma\tau}{kT}\right], \quad (2)$$

де v_{dv}^m — максимальна швидкість руху двійникових дислокацій при $\Delta q = \gamma\tau$, де Δq — зміна вільної енергії, пов'язана з подоланням перешкод, γ — активаційний об'єм, який дорівнює $\gamma = bhl$, \mathbf{b} — Бюргерсів вектор двійникової дислокації, h — ширина перешкоди, l — середня відстань між перешкодами, ξ — відстань, яку проходить дислокація після «успішної» флуктуації, яка, зазвичай, дорівнює $\xi = l$ [2], τ — зовнішня напруга в напрямку двійникування.

3. РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження виконувались на зразках магнійтермічного берилійового конденсату (МТК берилію, 99,95% Be), який знаходився в «інверсному стані» [5], в інтервалі температур 290–830 К. Аналізували амплітудні, температурні та часові залежності низькочастотного ($\cong 1$ Гц) внутрішнього тертя (ВТ), ефективного модуля зсуву ($G_{\text{ef}} \propto f^2$), відношення швидкостей руху дислокацій V/V_0 та параметрів гальмування дислокацій B_i в берилії.

Основні результати дослідження можна коротко звести до наступного.

1. У «звичайній» та «ауксетичній» областях температур виявили суттєву відмінність між характером кривих амплітудних залежностей (АЗ) ВТ (АЗВТ) та АЗ G_{ef} у берилії (див. рис. 1, а і б).

В області температур 300–400 К берилій не є ауксетиком, і будь-яке зростання деформації кручення супроводжується ростом Q^{-1} і зменшенням G_{ef} (рис. 1, а). Характер амплітудних залежностей G_{ef} і Q^{-1} в цьому інтервалі температур залишається незмінним, що добре узгоджується з класичними теоріями відриву [6], і свідчить про релаксацію дефектних підсистем у берилії в ході мікропластичної деформації при цих температурах шляхом відриву дислокацій від закріплених їх стопорів, що підтверджується також дослідженнями параметра гальмування дислокацій: і при 293, і при 373 К значення параметрів $B_1 = 13,11 \cdot 10^{-5}$ і $B_2 = 13,04 \cdot 10^{-5}$ практично однакові і під-

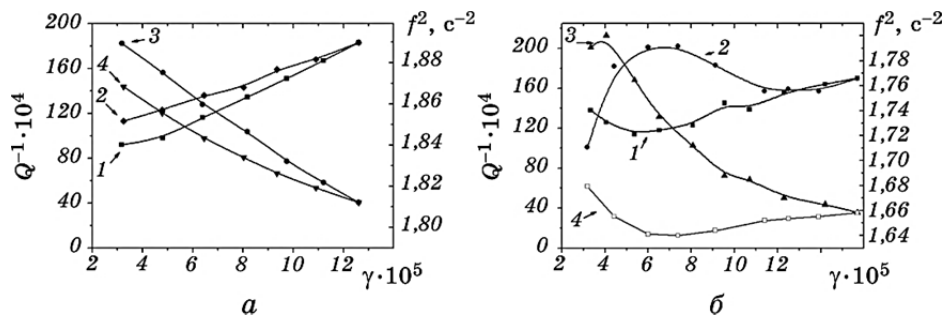


Рис. 1. Амплітудні залежності ВТ (1, 2) і f^2 (3, 4) МТК берилію в «неауксетичній» області температур (290 К). Криві 1, 3 одержано при зростанні γ , криві 2, 4 — при його зменшенні (а); амплітудні залежності ВТ (1, 2) і f^2 (3, 4) МТК берилію в «ауксетичній» області температур (593 К). Криві 1, 3 одержано при зростанні γ , криві 2, 4 — при його зменшенні (б).

Fig. 1. Amplitude dependences internal friction (1, 2) and f^2 (3, 4) in thermal-magnesium condensate (TMC) of beryllium at ‘non-auxetic’ temperatures (290 K). Curves 1, 3 obtained at increasing of γ , curves 2, 4—with its reduction (a); amplitude dependences of internal friction (IF) (1, 2) and f^2 (3, 4) in TMC of beryllium at ‘auxetic’ temperatures (593 K). Curves 1, 3 obtained by increasing γ , curves 2, 4—with its reduction (b).

тверджують існування єдиного механізму руху дислокацій в цьому інтервалі температур — гістерезного механізму.

Починаючи з 423 К берилій стає аксіальним ауксетиком, а з ростом температури до 593 К — майже повним ауксетиком, і амплітудні залежності ВТ і G_{ef} істотно змінюються (рис. 2, б): аномальне зменшення ВТ з ростом деформації змінюється на збільшення поглинання пружної енергії на фоні зміцнення ефективного модуля пружності. До того ж параметр гальмування зростає майже вдвічі від $B_{11} = 13,03 \cdot 10^{-5}$ до $B_{12} = 20,39 \cdot 10^{-5}$, вказуючи на існування в цьому ін-

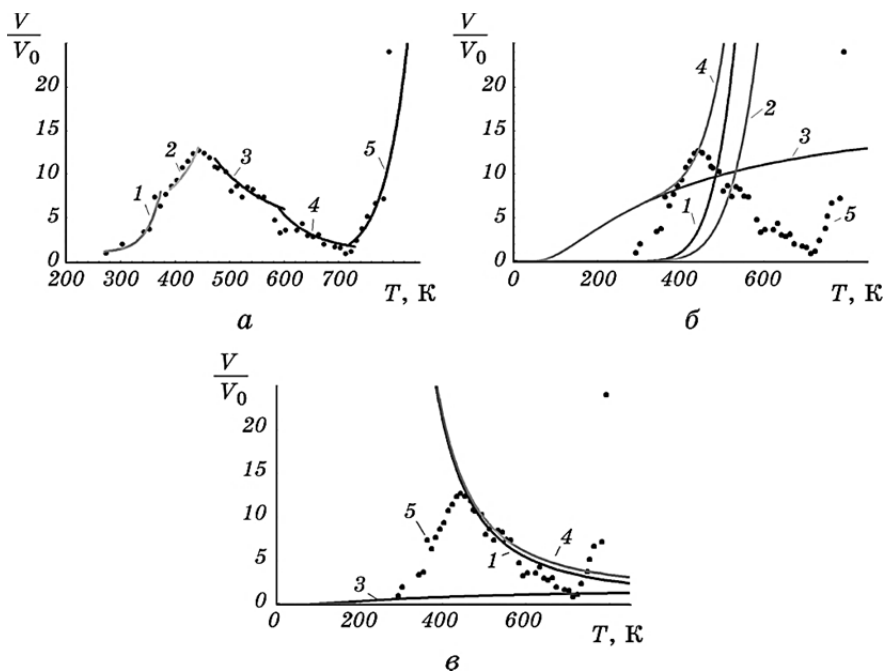


Рис. 2. Температурні залежності відношення швидкостей руху дислокацій V/V_0 у МТК берилію. Криві 1–5 розраховані за формулами (1) і (2), маркери — дані експерименту (а); компоненти температурних залежностей відношення швидкостей руху дислокацій V/V_0 у МТК берилію (крива 1 — відношення V/V_0 для крайових, 2 — гвинтових, 3 — двійникових дислокацій, 4 — їх сума) в «неауксетичній» області температур (б); те саме в «ауксетичній» області (в).

Fig. 2. Temperature dependences of the ratio of velocities of dislocations movement V/V_0 in TMC of beryllium at cooling. Curves 1–5 are calculated by formulas (1) and (2), markers correspond to experiment (a); components of the temperature dependences of the ratio of velocities of dislocations movement V/V_0 in TMC of beryllium (curves 1 corresponds to V/V_0 for the boundary, 2—for the screw 3—for the twin dislocations, 4—their sum) at ‘non-auxetic’ temperatures (b); the same as (b) but for ‘auxetic’ temperatures (c).

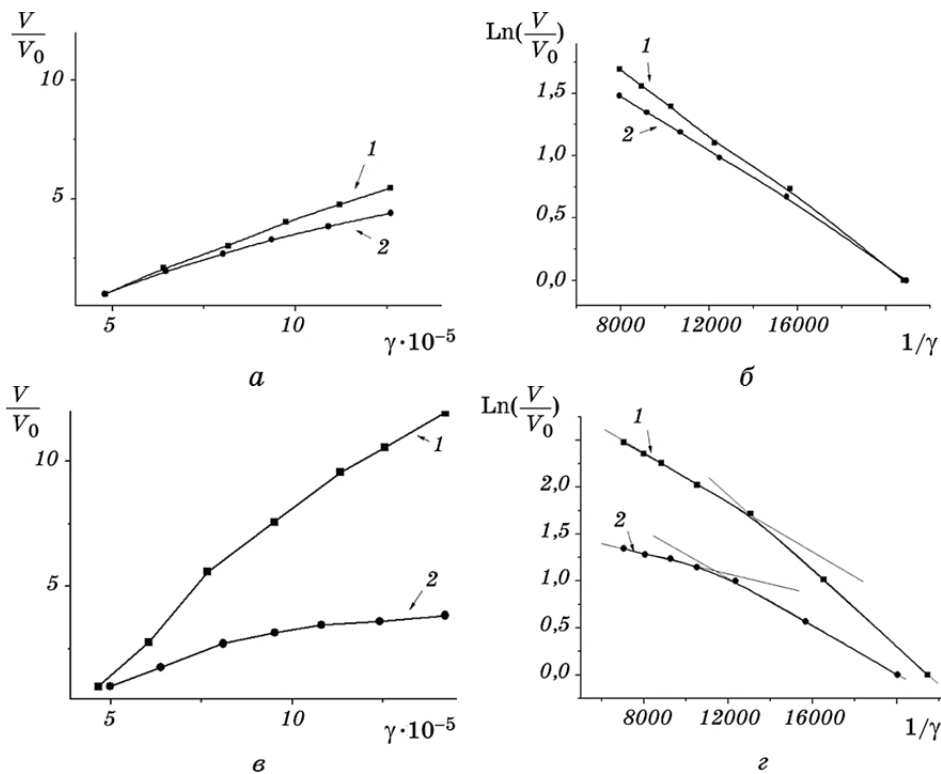


Рис. 3. Амплітудні залежності швидкості руху дислокацій при 290 К (*a*), залежності $\ln(V/V_0)$ від $1/\gamma$ при 290 К (*б*), амплітудні залежності швидкості руху дислокацій при 536 К (*в*) та залежності $\ln(V/V_0)$ від $1/\gamma$ при 536 К (*г*); 1 — при зростанні, 2 — при спаданні амплітуди деформації.

Fig. 3. Amplitude dependences of dislocations velocity at 290 K (*a*), the dependences of $\ln(V/V_0)$ on $1/\gamma$ at 290 K (*б*), amplitude dependences of dislocations velocity at 536 K (*в*), the dependences of $\ln(V/V_0)$ on $1/\gamma$ at 536 K (*г*); 1—for increasing of the amplitude of deformation, 2—for its decreasing).

тервалі температур як мінімум двох механізмів гальмування дислокацій (рис. 3, *г*).

2. Для з'ясування причин такої зміни кривих АЗВТ і АЗ G_{ef} за Бейкеровою методикою [7] було побудовано температурні залежності відношення швидкостей руху дислокацій в МТК берилію (рис. 2, *a*, крива 5), і шляхом математичного моделювання розраховано внески різних типів дислокацій в процес деформації (криві 1–4 на рис. 2, *a–в*).

Відношення швидкостей руху дислокацій (рис. 2, *б* і *в*, криві 1, 2) було розраховано за формулою (1) для крайової та гвинтової дислокацій відповідно, а для двійників — за формулою (2) (рис. 2, *б* і *в*,

крива 3).

При розрахунках швидкостей руху двійникових та крайових дислокацій враховували температурну залежність коефіцієнтів Пуассона і зміну їх знаку в температурних областях з різним типом ауксетичності. Виявлено, що в «ауксетичній» області основний внесок у відношення швидкостей руху V/V_0 роблять не двійники, а крайові дислокації (рис. 2, б і в), які вище 423 К спочатку інтенсивно гальмуються і лише при 770 К знову починають прискорюватися.

4. ВИСНОВКИ

1. Вперше виявлено різний характер залежностей $Q^{-1}(\gamma)$ і $G_{\text{ef}}(\gamma)$ в берилії в ауксетичній і неауксетичній областях температур і показано, що при переході в ауксетичний стан механізм поглинання пружної енергії змінюється з гістерезисного на двостадійний, який характеризується двома параметрами гальмування дислокацій.
2. Показано, що в області часткової ауксетичності берилію основний внесок у процес деформації роблять не двійники, а крайові дислокації, швидкість яких спочатку зменшується з ростом деформації і температури, а потім, вище 770 К, інтенсивно зростає.
3. Висока узгодженість експериментальних та розрахованих залежностей $V/V_0(T)$ свідчить про значний вплив ауксетичності на механізми мікропластичної деформації берилію та релаксацію його дефектних підсистем.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. M. D. Raransky, V. N. Balazyuk, and M. M. Gunko, *Fizyka i Khimiya Tverdogo Tela*, **16**, No. 1: 34 (2015) (in Ukrainian).
2. V. I. Bashmakov and T. S. Chikova, *Plastifikatsiya i Uprochnenie Metallicheskih Kristallov pri Mekhanicheskom Dvoynikovanii* [Plasticization and Hardening of Metallic Crystals During Mechanical Twinning] (Minsk: UP 'Tekhnoprint': 2001) (in Russian).
3. V. E. Panin, V. A. Likhachev, and Yu. V. Grinyaev, *Strukturnye Urovni Deformatsii Tverdyykh Tel* [Structural Levels of Deformation of Solids] (Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie: 1986) (in Russian).
4. N. N. Novikov, *Struktura i Strukturno-Chuvstvitel'nye Svoystva Real'nykh Kristallov* [Structure and Structure-Sensitive Properties of Real Crystals] (Kiev: Vishcha Shkola: 1983) (in Russian).
5. A. V. Olijnych-Lysyuk and M. D. Rarans'ky, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **28**, No. 12: 1661 (2006) (in Ukrainian).
6. V. S. Postnikov, *Vnutrennee Trenie v Metallakh* [Internal Friction in Metals] (Moscow: Nauka: 1974) (in Russian).
7. A. V. Oleynich-Lysyuk and N. D. Raransky, *Fizika Tverdogo Tela*, **54**: 417 (2012) (in Russian).