

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

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

Вплив типу ауксетичности на пружні та непружні характеристики берилію

М. Д. Раранський, А. В. Олійнич-Лисюк, О. Ю. Тащук, Є. І. Кюрек

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2,
58012 Чернівці, Україна*

В роботі досліджено особливості поведінки пружних (пружної податливості й ефективного модуля зсуву) та непружних (низькочастотного внутрішнього тертя (Q^{-1})) характеристик магнійтермічного берилієвого конденсату в областях температур з різним типом ауксетичности. В рамках дислокаційно-дисклінаційного моделю оцінено вплив величини і знаку Пуассонових коефіцієнтів на температурні залежності швидкостей руху дислокацій при мікропластичній деформації в берилії. Показано, що зміну характеру руху дефектів при циклічній деформації цього металу з ростом температури можна успішно описати врахуванням адитивного внеску двійників, крайових і гвинтових дислокацій, які рухаються в полі зовнішніх напруг, та напруг, створених як точковими дефектами, так і дислокаціями лісу.

Ключові слова: внутрішнє тертя, пружня податливість, швидкість руху дислокацій, типи ауксетичности, Пуассонові коефіцієнти, берилій.

В работе исследованы особенности поведения упругих (упругой податливости и эффективного модуля сдвига) и неупругих (низкочастотного внутреннего трения (Q^{-1})) характеристик магнийтермического бериллиевого конденсата в областях температур с разным типом ауксетичности. В рамках дислокационно-дисклинационной модели оценено влияние вели-

Corresponding author: Oleksandr Yuriyovych Tashchuk
E-mail: sashatashuk@gmail.com

*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsjubytskyi Str., 58012 Chernivtsi, Ukraine*

Please cite this article as: M. D. Rarans'ky, A. V. Oleynich-Lysyuk, O. Yu. Tashchuk, and Ye. I. Kurek, Influence of the Type of Auxetic Effect on the Elastic and Inelastic Properties of Beryllium, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 7: 923–934 (2016) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.38.07.0923.

чини и знака коэффициентов Пуассона на температурные зависимости скоростей движения дислокаций при микропластической деформации в бериллии. Показано, что изменение характера движения дефектов при циклической деформации этого металла с ростом температуры можно успешно описать учётом аддитивного вклада двойников, краевых и винтовых дислокаций, движущихся в поле внешних напряжений, и напряжений, созданных как точечными дефектами, так и дислокациями леса.

Ключевые слова: внутреннее трение, упругая податливость, скорость движения дислокаций, типы аусетичности, коэффициенты Пуассона, бериллий.

In this article, the features of the behaviour of the elastic (elastic compliance and effective shear modulus) and inelastic (low-frequency internal friction (Q^{-1})) characteristics of magnesium-thermal beryllium condensate (MTC Be) in the temperature ranges with different types of auxetic effect are investigated. The influence of both the value and the sign of the Poisson's ratios on the temperature dependences of the rate of dislocations at microplastic deformation in beryllium are calculated within the scope of the dislocation-disclination model. As shown, the changing nature of the motion of defects under cyclic deformation of this metal with increasing temperature can be successfully described taking into account both the additive contribution of twins, edge and screw dislocations moving in the field of external stresses and strains, which create by both point defects and forest dislocations.

Key words: internal friction, elastic compliance, rate of dislocations, type of auxetic effect, Poisson's ratios, beryllium.

(Отримано 2 липня 2015 р. — остаточн. варіант — 28 червня 2016 р.)

1. ВСТУП

Дослідження пружних властивостей кристалів з різним типом хемічного зв'язку, проведені на кафедрі фізики твердого тіла Чернівецького національного університету, показали, що значна кількість кристалів різних сингоній характеризуються суттєвою нелінійністю пружних властивостей, яка проявляється, зокрема, в інверсії знаку Пуассонових коефіцієнтів ν_{ij} . За речовинами, в яких Пуассонові коефіцієнти набувають від'ємних значень, наразі закріпилася назва аусетика [1]. Аусетиками є чимало конструкційних матеріалів, серед яких особливе місце займає Be, якому притаманне унікальне поєднання фізико-механічних властивостей, які, незважаючи на високу крихкість цього металу за температур експлуатації, роблять його незамінним конструкційним елементом в аерокосмічній та атомній галузях промисловости. На сьогоднішній день проблема крихкості берилію залишається нерозв'язаною, а тому привабливою як для науковців, так і для технологів. Крім того, відомо, що Be є аусетиком з різним типом аусетичности в різних

областях температур [1]. Тому цю роботу ми присвятили дослідженню особливостей мікропластичної деформації цього металу в широкому інтервалі температур, який охоплює структурні стани з різним типом ауксетичності, шляхом вивчення особливостей зміни його пружних і непружних характеристик.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Для матеріалів із від'ємними Пуассоновими коефіцієнтами можна виділити такі основні типи ауксетичності: аксіальна ауксетичність — від'ємних значень компоненти тензора Пуассонових коефіцієнтів ν_{ij} набувають вздовж кристалографічних напрямків типу $\langle 100 \rangle$, неаксіальна ауксетичність — від'ємні значення ν_{ij} проявляються у кристалографічних напрямках, що не відповідають напрямкам $\langle 100 \rangle$, повна ауксетичність — ν_{ij} у всіх напрямках у кристалі мають від'ємні значення.

Використовуючи відоме Ройсове співвідношення (1) та дані про модулі пружної жорсткості, одержані в роботах [2, 3], ми розраховували температурні залежності коефіцієнтів пружної податливості для Ве, компоненти тензора Пуассонових коефіцієнтів ν_{ij} при 0–575 К і провели оцінку критеріїв ауксетичності, запропонованих Р. В. Гольдштейном [4], у вказаному інтервалі температур (рис. 1, табл. 1)

$$\nu'_{ij} = -\frac{S'_{ijj}}{S'_{iii}}. \quad (1)$$

Відповідно до критерію, запропонованого в [4], гексагональний кристал не є ауксетиком, якщо виконується умова (2). Якщо умова (2) виконується частково, то він є неповним ауксетиком. Відмітимо, що додатний знак лише величини Q є умовою неаксіальної ауксетичності (3):

$$S_{13} < 0, S_{12} < 0, Q < 0, \quad (2)$$

$$S_{13} < 0, S_{12} < 0, Q > 0, \quad (3)$$

$$S_{13} < 0, S_{12} > 0, Q > 0, \quad (4)$$

де $Q = S_{11} + S_{33} + 2S_{13} - S_{44}$.

Аналіз одержаних результатів вказує на те, що Ве тільки у вузькому інтервалі температур від 300 до 400 К не проявляє ауксетичних властивостей і має додатні значення компонент тензора Пуассонових коефіцієнтів для всіх напрямків у кристалі (величини $S_{13} < 0, S_{12} < 0, Q < 0$). За всіх інших температур йому притаманна часткова ауксетичність різного типу. Так, в інтервалі 0–300 К ви-

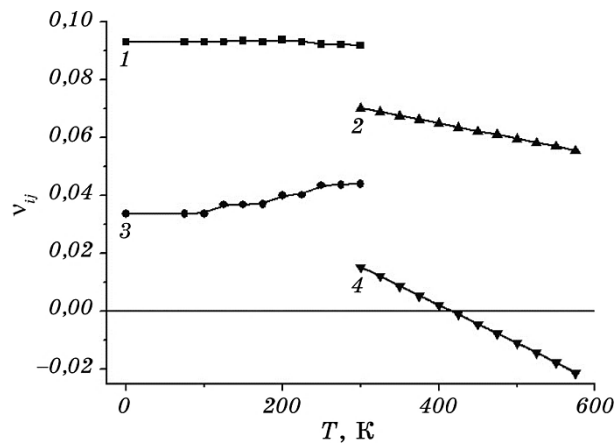


Рис. 1. Температурні залежності компонент тензора Пуассонових коефіцієнтів v_{ij} для Be. Криві 1–3 розраховано за даними, одержаними в роботі [3], криві 2–4 — за даними роботи [4]. Криві 1, 2 — для компоненти v_{12} , криві 3, 4 — v_{13} .

Fig. 1. Temperature dependences of tensor components of Poisson coefficients v_{ij} for Be. Curves 1–3 are calculated by data obtained in [3], curves 2–4—according to [4]. Curves 1, 2—for component v_{12} , curves 3, 4— v_{13} .

конується умова (3) $S_{13} < 0$, $S_{12} < 0$, $Q > 0$, тобто Be є неаксіальним ауксетиком, а за температур 400–425 К — умова (4) $S_{13} < 0$, $S_{12} > 0$, $Q > 0$ — він стає аксіальним ауксетиком, між 425 та 475 К берилій є майже повним ауксетиком, з певними напрямками у кристалі, в яких Пуассонів коефіцієнт залишається додатнім, і вище 475 К він стає повним ауксетиком. Тобто в досліджуваному нами інтервалі температур характер ауксетичности Be може змінюватись при 300, 400, 425 і 475 К (див. табл. 1) у послідовності неаксіальний ауксетик → неауксетик → аксіальний ауксетик → майже повний ауксетик → повний ауксетик [1].

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Досліджували магнітермічний берилійовий конденсат (МТК Be, 99,93% Be). Полікристалічні зразки у вигляді дротин квадратного перерізу зі стороною $\cong 1$ мм і довжиною робочої частини 80–100 мм вирізали із пластин конденсату, одержаних із парової фази на підкладки з температурою 500–600°C, з подальшим видаленням підкладки та деформованого шару. При конденсації кристаліти росли в напрямку осі c , перпендикулярному до площини підложжя. Для дослідження підбирали зразки, які мали добре виражений стовбчастий характер і склалися з кристалітів розмірами 50–56 мкм в

ТАБЛИЦА 1. Температурна залежність критерію ауксетичности для Be за Р. В. Гольдштейном [5].**TABLE 1.** Temperature dependence of auxetic criteria for Be according to R. V. Goldshtein [5].

| T, K | S_{12} | S_{13} | Q |
|--------|------------|------------|----------------------|
| 0 | -0,0312705 | -0,0098341 | 0,007583 |
| 75 | -0,0312705 | -0,0098341 | 0,007583 |
| 100 | -0,0313132 | -0,0098429 | 0,007878 |
| 125 | -0,0313357 | -0,0107504 | 0,00611 |
| 150 | -0,0315173 | -0,0107632 | 0,005525 |
| 175 | -0,0314114 | -0,0108024 | 0,005352 |
| 200 | -0,0317506 | -0,0117411 | 0,002997 |
| 225 | -0,0316335 | -0,011806 | 0,002966 |
| 250 | -0,031479 | -0,012827 | 0,001288 |
| 275 | -0,0315432 | -0,012937 | 0,00112 |
| 300 | -0,0316514 | -0,0130644 | 0,000955 |
| 300 | -0,0243505 | -0,0042948 | -0,0241 |
| 325 | -0,024211 | -0,0034448 | -0,02052 |
| 350 | -0,0239079 | -0,0024683 | -0,01658 |
| 375 | -0,0237305 | -0,0015492 | -0,01253 |
| 400 | -0,023534 | -0,0005925 | -0,0084 |
| 425 | -0,023171 | 0,0003021 | -0,00411 |
| 450 | -0,0229142 | 0,0013342 | $-4,2 \cdot 10^{-5}$ |
| 475 | -0,0227808 | 0,0022999 | 0,003891 |
| 500 | -0,0224717 | 0,0033009 | 0,008182 |
| 525 | -0,0221395 | 0,0043393 | 0,012635 |
| 550 | -0,021913 | 0,0054177 | 0,016942 |
| 575 | -0,0215161 | 0,0065478 | 0,022274 |

діаметрі і довжиною до 1 мм, осі s яких були перпендикулярними до головної осі зразків. Розміри кристалітів у зразках визначали методом зворотної зйомки в CuK_{α} -випроміненні. Рентгенівські дослідження показали також, що симетрія таких кристалітів відповідала гексагональному щільному пакуванню.

Вимірювання проводились на напівавтоматичному релаксометри типу зворотний крутильний маятник, який діє за принципом реєстрації часових інтервалів проходження світлового променя між стаціонарно встановленими фотоприймальними пристроями, на частотах 1–3 Гц у вакуумі $\cong 10^{-3}$ Па.

Внутрішнє тертя визначали із співвідношення:

$$Q^{-1} = \pi n (1 + (t_n - t_0) / T_n)^{-1} \ln \frac{\sin(2\pi n t_n / T_n)}{\sin(2\pi n t_0 / T_n)}, \quad (5)$$

де t_0 і t_n — часові проміжки прольоту світлового променя між стаціонарно встановленими фотоприймальними пристроями, що розміщені на віддалі S , n — кількість коливань, T_n — час n коливань.

Деформацію γ підраховували за формулою

$$\gamma = kS / \sin(2\pi n t_0 / T_n). \quad (6)$$

Досліджували квадрат частоти власних згасних коливань зразка f^2 , пропорційний до ефективного модуля зсуву G_{ef} і пов'язаний з ним співвідношенням:

$$G_{\text{ef}} = \frac{l}{\alpha a^3 b} (4\pi J f^2 - k), \quad (7)$$

де J — момент інерції, α — const, $k = \text{const}$ — пружність підвісу при кручені, f — частота згасних коливань, a , b , l — товщина, ширина, довжина зразка. Значення f^2 вимірювали синхронно з внутрішнім тертям (ВТ). Похибка при вимірюванні внутрішнього тертя не перевищувала 1–2%, а для f^2 — 0,1%.

Температуру вимірювали в інтервалі 293–750 К хромель-алюмелевою термопарою, розміщеною навпроти середини зразка. При дослідженні температурних залежностей ВТ і f^2 вимірювання проводили в динамічному режимі зі швидкостями нагріву (охолодження) $\cong 2^\circ/\text{хв.}$, що уможливило уникнути помітних гістерезисних явищ. При дослідженні температурних АЗВТ (амплітудні залежності внутрішнього тертя) температуру зразків стабілізували з точністю $\pm 1^\circ\text{C}$ впродовж 30 хв. на струмах насичення.

За методикою, запропонованою в [9], із температурно-амплітудних залежностей f^2 розраховували температурні й амплітудні залежності відношення швидкостей руху дислокацій в МТК Ве:

$$\frac{V(T)}{V_0(T)} = \frac{(f_n^2 - f_0^2) / f_0^2}{((f_n^2 - f_0^2) / f_0^2)_0}, \quad (8)$$

$$\frac{V(\gamma)}{V_0(\gamma)} = \frac{(f_n^2 - f_0^2) / f_0^2}{((f_n^2 - f_0^2) / f_0^2)_0}, \quad (9)$$

де f_0 — частота власних згасних крутильних коливань, f_n — частота зразка при зміні температури/амплітуди деформації.

Щоб з'ясувати тип дефектів, які роблять внесок в мікродеформацію берилійових зразків, спробували змоделювати деформацію в

ньому, скориставшись напівемпіричними залежностями, запропонованими в роботі [8], для швидкостей руху повних дислокацій:

$$v = j^* \left(\frac{\tau^*}{\tau} \right) \exp \left(- \frac{\Delta U}{kT} \right), \quad (10)$$

де $j^* \sim L_N$ — пробіг дислокацій, τ — прикладена механічна напруга, $\tau^* = \alpha G b \rho^{1/2}$ — атермічна складова внутрішніх напружень, які діють на дислокацію, для крайової дислокації α набуває значення $\alpha_k = 1 / [2\pi(1 - \nu)]$, а для гвинтової $\alpha_h = 1 / 2\pi$ [6], ΔU — енергія активації процесу, яку розраховували із запропонованого у роботі [7] співвідношення $\Delta U = \Delta q - \gamma\tau^* = 2\gamma\tau^*$.

Швидкість руху двійників оцінювали за формулою

$$v = v_{dv}^m \exp [- (\Delta q - \gamma\tau) / (kT)], \quad (11)$$

де v_{dv}^m — максимальна швидкість руху двійника, Δq — зміна вільної енергії двійника, $\gamma = bhl = 3,6 \cdot 10^{-33} \text{ м}^{-3}$ — величина активаційного об'єму [8].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 2 представлені температурно-амплітудні залежності низькочастотного ВТ і f^2 в МТК Be, виміряні в інтервалі 300–700 К. Вимірювання температурних залежностей проводилось у динамічному режимі та супроводжувалося додатковою циклічною деформацією при дослідженні амплітудних залежностей ВТ і f^2 за різних температур. Результати досліджень показали, що в інтервалі від 300 до 400 К (де Be не проявляє ауксетичних властивостей) криві АЗВТ та АЗ (амплітудні залежності ефективного модуля зсуву) f^2 мають характер близький до «класичного» (рис. 3, а), який непогано описується в рамках теорії Келлера–Гранато–Люкке (КГЛ). Незначні гістерезні явища у поглинанні пружної енергії та в зміні ефективного модуля зсуву, які супроводжуються невеликим незмиканням петель $Q^{-1}(\gamma)$ та $f^2(\gamma)$, свідчать про майже повну зворотність процесів мікропластичної деформації при зменшенні відносної деформації γ . Цей висновок підтверджується також і температурними залежностями ВТ і f^2 , які реагують на прикладену циклічну деформацію незначними зростанням ВТ та зменшенням ефективного модуля (рис. 2, рис. 3, а).

Однак ситуація змінюється, як тільки Be деформувати за температур вищих 475 К: на температурно-амплітудних залежностях ВТ і f^2 (рис. 2) з'являються ефекти стрибкоподібної зміни поглинання пружної енергії, які супроводжуються такими ж стрибкоподібними зменшеннями f^2 (а отже і ефективного модуля кручення); харак-

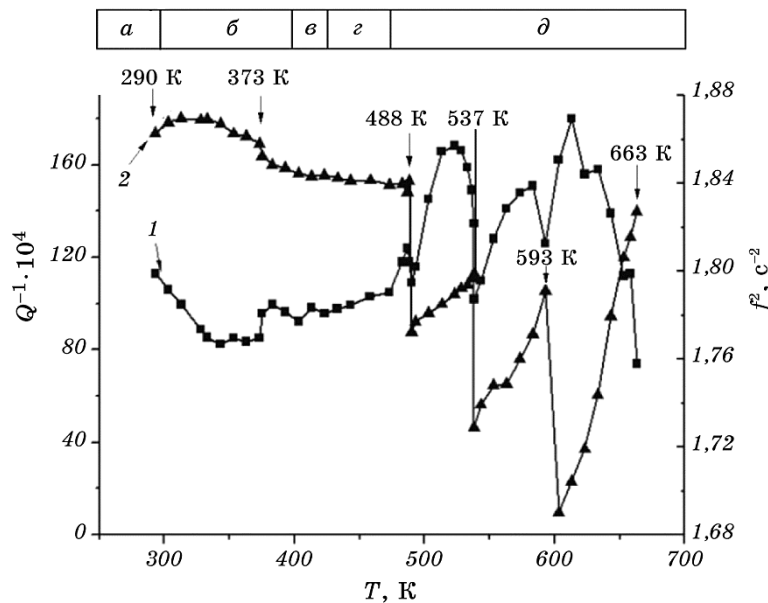


Рис. 2. Температурно-амплітудні залежності ВТ (1) та $f^2 \sim G_{ef}$ (2) МТК Ве: *a* — область неаксіальної ауксетичності, *б* — неауксетична область, *в* — область аксіальної ауксетичності, *з* — область майже повної ауксетичності, *д* — область повної ауксетичності.

Fig. 2. Temperature–amplitude dependences of internal friction (1) and $f^2 \sim G_{ef}$ (2) МТК Ве: *a*—area of non-axial auxetic effect, *б*—area of non-auxetic effect, *в*—area of axial auxetic effect, *з*—area of almost complete auxetic effect, *д*—area of complete auxetic effect.

тер кривих АЗВТ також стає принципово іншим (рис. 3, *в*, *з*), особливо при зменшенні γ . Як бачимо, в цій області температур поведінка і ВТ, і f^2 аномальна: зменшення ВТ супроводжується зменшенням f^2 (рис. 3, *в*, *з*), що не можна описати за допомогою класичної теорії КГЛ. Стрибкоподібна зміна ВТ і f^2 з ростом температури може свідчити про зародження у кристалі в процесі деформації пружних двійників, які наростають при зростанні γ і зникають при його зменшенні [5]. Поява яскравих максимумів поглинання пружної енергії на кривих АЗВТ свідчить на користь припущення про значну перебудову дислокаційної підсистеми, яка при зменшенні деформації γ має, як мінімум, два типи різних перешкод для руху дислокацій. Ми припустили, у слід за авторами [5, 6], що це точкові дефекти та дислокації лісу.

Таким чином, при вимірюванні температурно-амплітудних залежностей ВТ і f^2 основний внесок в поведінку пружних та непружних характеристик Ве можуть робити такі типи дефектів: пружні

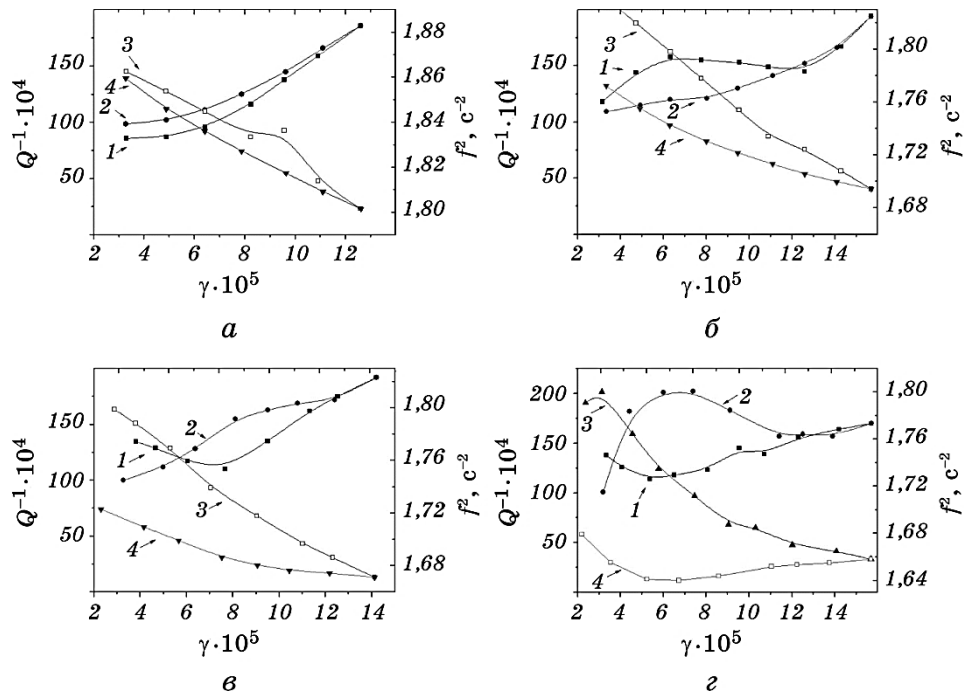


Рис. 3. Амплітудні залежності ВТ (1, 2) і f^2 (3, 4) МТК Ве за різних температур: 373 К (а), 488 К (б), 536 К (в), 593 К (г). Криві 1, 3 виміряно при зростанні амплітуди деформації γ , а криві 2, 4 — при зменшенні γ .

Fig. 3. Amplitude dependences of internal friction (1, 2) and f^2 (3, 4) for MTC Be at different temperatures: 373 K (a), 488 K (б), 536 K (в), 593 K (г). Curves 1 and 3 measured at increasing strain amplitude γ , curves 2 and 4—at decreasing strain amplitude γ .

двійники, крайові та гвинтові дислокації, які в процесі деформації рухаються під дією прикладених до них механічних напружень та полів напружень, які створюються точковими дефектами, дислокаціями лісу та пружними двійниками.

Виходячи із цих припущень, ми розрахували відношення швидкостей руху дислокацій за формулою (11). Розрахунки показали, що зміна температури, знаку Пуассонового коефіцієнта на протилежний в певних напрямках у кристалі змінює співвідношення між швидкостями руху цих дефектів (рис. 4). При низьких температурах і додатних значеннях компонент тензора Пуассонових коефіцієнтів в напрямку $\langle 0001 \rangle$ домінують гвинтові та крайові дислокації, оскільки їх швидкості руху вищі, ніж у двійникових дислокацій. Вище 475 К швидкість руху останніх зростає і починає переважати відношення швидкостей руху гвинтових і крайових дислокацій, що свідчить про зростання їх внеску у процес деформації та пі-

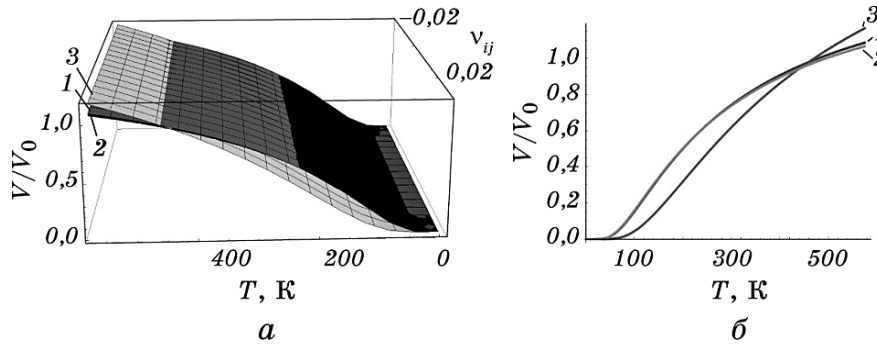


Рис. 4. Температурні залежності $V(T, \nu)/V_0(T, \nu)$ МТК Ве в напрямку $\langle 0001 \rangle$. Поверхня 1 — для гвинтових, 2 — крайових та 3 — двійникових дислокацій (а); температурні залежності $V(T)/V_0(T)$ в напрямку $\langle 0001 \rangle$ при значенні $\nu_{13} = -0,02$. Криві 1 — для гвинтових, 2 — крайових та 3 — двійникових дислокацій (б).

Fig. 4. Temperature dependences of $V(T, \nu)/V_0(T, \nu)$ for MTC Be towards the $\langle 0001 \rangle$. Surface 1—screw, 2—edge, 3—twin dislocations (a); temperature dependence $V(T)/V_0(T)$ in the direction $\langle 0001 \rangle$ at the value $\nu_{13} = -0,02$. Curves 1—screw, 2—edge, and 3—twin dislocations (b).

дтверджується результатами досліджень інших авторів, одержаних прямими експериментальними методами [6].

Одержаний результат уможливило нам також пояснити принципову відмінність поведінки кривих $Q^{-1}(\gamma)$ та $G_{ef}(\gamma)$ за температур вище 475 К (порівняйте рис. 3, б і рис. 3, в, г). Справді, основні зовнішні напруження у кристалітах наших зразків створювались у напрямках типу $\langle 100 \rangle$ у площині (110) — в напрямках аксіальної ауксетичности, тому при температурах, що нижчі температур повної ауксетичности, повні дислокації в аксіальних напрямках починали відчувати опір своєму рухові, сповільнювались і подальша деформація реалізувалася за рахунок двійників, швидкість руху яких зростала. Певно, нам вдалось зафіксувати процес переходу від дислокаційного до дисклінаційного механізму в Ве при підвищенні температури (рис. 3, б). Якщо останнє припущення вірне, то в МТК Ве спостерігається деяке зміщення температур переходу з аксіально-ауксетичного в майже повністю ауксетичний стан в сторону вищих, ніж це впливає з табл. 1, температур. Однак для його спростування чи підтвердження потрібні додаткові дослідження.

На рисунку 5 представлені температурні залежності відношення швидкостей руху зазначених дефектів у Ве, розраховані за формулами (11), (12), а також оцінені з температурних залежностей f^2 за методикою, запропонованою в [9]. Як бачимо, відношення швидкостей руху двійників, крайових та гвинтових дислокацій, які рухаються в полі зовнішніх напружень та напружень, що створюються

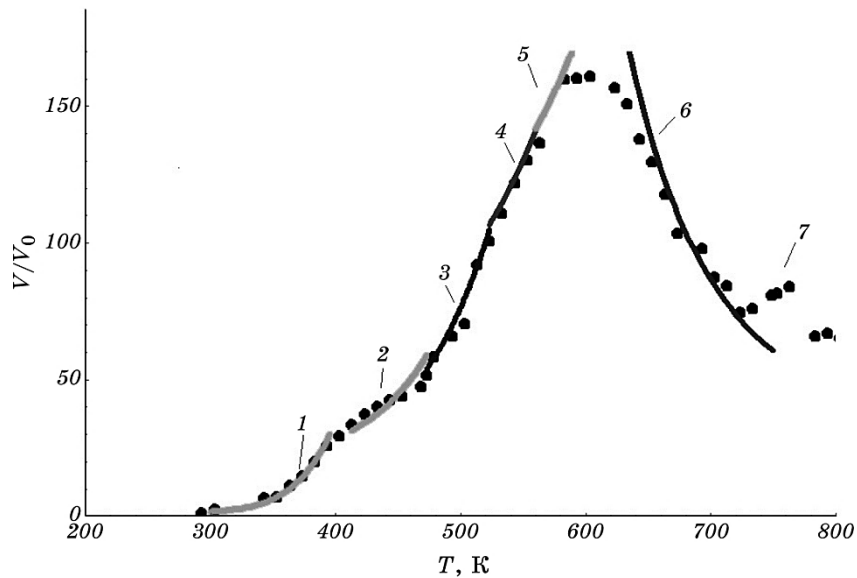


Рис. 5. Температурні залежності відношення швидкостей руху дислокацій V/V_0 у МТК Be при охолодженні. Криві 1–6 розраховано за формулами (10) і (11). Криву 7 оцінено з експерименту за формулою (8).

Fig. 5. Temperature dependences of the ratio of velocities of dislocations moving V/V_0 in MTC Be at cooling. Curves 1–6 are calculated by formulas (10) and (11). Curve 7 is evaluated by formula (8) with using experimental data.

точковими дефектами і дислокаціями лісу, теоретично розраховані за формулами (11), (12), і експериментально визначені із відношень $(\Delta f)^2/f^2$ добре узгоджуються, що може свідчити про правильність наших припущень як про типи домінуючих дефектів, які беруть участь у деформації, так і про вплив величини і знаку Пуассонових коефіцієнтів на процес мікропластичної деформації Be.

5. ВИСНОВКИ

1. Виявлено стрибкоподібну зміну температурних залежностей VT і f^2 в МТК Be, яка виникає в процесі мікропластичної деформації цього металу при температурах повної ауксетичності.
2. Шляхом математичного моделювання швидкостей руху дефектів в широкому інтервалі температур показано, що основний внесок у поведінку пружних і непружних характеристик Be дають двійники, крайові та гвинтові дислокації. При додатних значеннях Пуассонових коефіцієнтів основну роль відіграють гвинтові та крайові дислокації, які при підвищенні температури і появи від'ємних значень

v_{ij} гальмуються, і при переході в область повної ауксетичності двійникові дислокації стають домінуючим типом дефектів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. Д. Раранський, В. Н. Балазюк, М. М. Гунько, *Фізика і хімія твердого тіла*, **16**, № 1: 34 (2015).
2. И. И. Папилов, Г. Ф. Тихинский, *Физическое металловедение бериллия* (Москва: Атомиздат: 1968).
3. W. D. Rowland and J. S. White, *J. Phys. F: Metal Phys.*, **2**, No. 2: 231 (1972).
4. Р. В. Гольдштейн, В. А. Городцов, Д. С. Лисовенко, *Письма о материалах*, **3**, № 1: 7 (2011).
5. М. В. Классен-Неклюдова, *Механическое двойникование кристаллов* (Москва: АН СССР: 1960).
6. И. И. Папилов, Г. Ф. Тихинский, *Пластическая деформация бериллия* (Москва: Атомиздат: 1973).
7. Н. Н. Новиков, *Структура и структурно-чувствительные свойства реальных кристаллов* (Киев: Вища школа: 1983).
8. В. И. Башмаков, Т. С. Чикова, *Пластификация и упрочнение металлических кристаллов при механическом двойниковании* (Минск: УП «Технопринт»: 2001).
9. А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Фізика твёрдого тела*, **54**, вып. 3: 417 (2012).

REFERENCES

1. N. D. Rarans'ky, V. N. Balazyuk, and M. M. Gun'ko, *Fizyka i Khimiya Tverdogo Tila*, **16**, No. 1: 34 (2015) (in Ukrainian).
2. I. I. Papirov and G. F. Tikhinskiy, *Fizicheskoe Metallovedenie Berilliya* [Physical Metallography of Beryllium] (Moscow: Atomizdat: 1968) (in Russian).
3. W. D. Rowland and J. S. White, *J. Phys. F: Metal Phys.*, **2**, No. 2: 231 (1972).
4. R. V. Gol'dshteyn, V. A. Gorodtsov, and D. S. Lisovenko, *Pis'ma o Materialakh*, **3**, No. 1: 7 (2011) (in Russian).
5. M. V. Klassen-Neklyudova, *Mekhanicheskoe Dvoynikovanie Kristallov* [Mechanical Twinning of Crystals] (Moscow: AN SSSR: 1960) (in Russian).
6. I. I. Papirov and G. F. Tikhinskiy, *Plasticheskaya Deformatsiya Berilliya* [Plastic Deformation of Beryllium] (Moscow: Atomizdat: 1973) (in Russian).
7. N. N. Novikov, *Struktura i Strukturno-Chuvstvitel'nye Svoystva Real'nykh Kristallov* [The Structure and Structure-Sensitive Properties of Real Crystals] (Kiev: Vishcha Shkola: 1983) (in Russian).
8. V. I. Bashmakov and T. S. Chikova, *Plastifikatsiya i Uprochnenie Metallicheskiykh Kristallov pri Mekhanicheskom Dvoynikovanii* [Plasticization and Hardening of Metallic Crystals during Mechanical Twinning] (Minsk: UP 'Tekhnoprint': 2001) (in Russian).
9. A. V. Oleynich-Lysyuk and N. D. Rarans'ky, *Fizika Tverdogo Tela*, **54**, Iss. 3: 417 (2012) (in Russian).