Металлофиз. новейшие технол. / Metallofiz. Noveishie Tekhnol.
2018, т. 40, № 11, сс. 1453–1463 / DOI: 10.15407/mfint.40.11.1453
Оттиски доступны непосредственно от издателя
Фотокопирование разрешено только
в соответствии с лицензией

© 2018 ИМФ (Институт металлофизики
им. Г. В. Курдюмова НАН Украины)

Напечатано в Украине.

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ

PACS numbers: 61.72.Hh, 61.72.Lk, 62.20.de, 62.20.dj, 62.40.+i, 65.40.De, 81.40.Jj

Особливості деформації в кристалах In у широкому інтервалі температур

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

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

У роботі представлено результати дослідження просторово-температурних розподілів модулів Юнґа (*E*), компонент тензора Пуассонових коефіцієнтів ν_{ij}, коефіцієнтів термічного розширення α_{ij}, полів напруження та пружніх зміщень навколо крайових і ґвинтових дислокацій в індії у широкому температурному інтервалі (від кріогенних температур до температури топлення). Встановлено задовільну кореляцію просторово-температурних залежностей Пуассонових коефіцієнтів і коефіцієнтів теплового розширення між собою та з характеристичними поверхнями модуля Юнґа, що можна пояснити їхньою високою чутливістю до найменших змін у фононному спектрі In за різних температур і кристалографічних напрямків. Шляхом візуалізації просторового розподілу компонент тензора механічних напружень і вектора зміщень навколо дислокацій показано, що дефекти кристалічної будови в «нормальному» і «ауксетичному» індії мають різні механічні характеристики, які відрізняються як за величиною, так і за напрямком у кристалі та здатні ініціювати різну поведінку дефектів одного й того ж типу в зовнішніх температурно-силових полях, що особливо важливо враховувати при прогнозуванні механічних властивостей малорозмірних об'єктів (плівок, мікроконтактів, нанокристалів) з цього металу.

Ключові слова: Пуассонові коефіцієнти, температурно-просторовий роз-

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

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsyubynsky Str., UA-58012 Chernivtsi, Ukraine

Citation: M. D. Raransky, A. V. Oliynych-Lysyuk, R. Yu. Tashchuk, O. V. Lysyuk, and O. Yu. Tashchuk, Features of Deformation in Crystals of Indium in a Wide Range of Temperatures, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 11: 1453–1463 (2018) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.40.11.1453.

поділ, дислокації, індій.

The paper presents the results of the study of the spatial–temperature distribution of the Young's modules (*E*), the components of Poisson's-coefficient tensor, the coefficients of thermal expansion, stress fields and elastic displacements around edge and screw dislocations in indium in a wide temperature range (from cryogenic temperatures to melting one). The satisfactory correlation between the spatial–temperature dependences of the Poisson's coefficients and the coefficients of thermal expansion between each other and the characteristic surfaces of the Young's modulus is revealed that can be explained by their high sensitivity to the smallest changes in the phonon spectrum of this metal at different temperatures and in different crystallographic directions. By visualizing the spatial distribution of both the components of tensor of mechanical stresses and the displacement vector around the dislocations, it is shown that the defects of the crystalline structure in the 'normal' and 'auxetic' indium have different mechanical characteristics, which differ in both magnitude and direction in the crystal, and are able to initiate different behaviour of the same defects in external temperature–force fields that is especially important to take into account when predicting the mechanical properties of small-size objects (films, microcontacts, nanocrystals) based on this metal.

Key words: Poisson's coefficients, temperature–spatial distribution, dislocations, indium.

В работе представлены результаты исследования пространственно-температурных распределений модулей Юнга (*E*), компонент тензора коэффициентов Пуассона (ν_{ij}), коэффициентов термического расширения (α_{ij}), полей напряжения и упругих смещений вокруг краевых и винтовых дислокаций в индии в широком температурном диапазоне (от криогенных температур до температуры плавления). Установлена корреляция пространственно-температурных зависимостей коэффициентов Пуассона и коэффициентов теплового расширения между собой и с характеристическими поверхностями модуля Юнга, что можно объяснить их высокой чувствительностью к малейшим изменениям в фононном спектре этого металла при различных температурах и в различных кристаллографических направлениях. Путём визуализации пространственного распределения компонент тензора механических напряжений и вектора смещений вокруг дислокаций показано, что дефекты кристаллического строения в «нормальном» и «ауксетическом» индии имеют различные механические характеристики, которые отличаются как по величине, так и по направлению в кристалле и способны инициировать различное поведение во внешних температурно-силовых полях дефектов одного и того же типа.

Ключевые слова: коэффициенты Пуассона, температурно-пространственное распределение, дислокации, индий.

(Отримано 17 липня 2018 р.)

1. ВСТУП

Індій, який має унікальні фізико-механічні властивості, використовують як контактний та ущільнюючий матеріял в електронному та космічному приладобудуванні. Зазвичай, такі прилади працюють в екстремальних температурно-механічних умовах, що приводить до розтріскування In через виникнення суттєвих механічних напружень, які супроводжуються деформацією і руйнуванням контактів [1].

Для коректного опису таких явищ важливо враховувати не тільки наявність контактних напруг на межі з'єднання «елемент–підкладинка», наявність термічних напруг за рахунок сильної анізотропії коефіцієнтів термічного розширення [1, 2], але й характер поведінки коефіцієнтів Пуассона в індії у широкому інтервалі температур.

Так, автори [1] проводили розрахунок напружень, які виникають у індійових мікроконтактах при кріотермоциклюванні, виходячи із припущень про наявність дислокацій невідповідности на межі «елемент–підкладинка» та різну енергію активації крипу в цьому матеріялі при різних температурах (від $0{,}18T_m$ до $0{,}7T_m$, де T_m — температура топлення), не враховуючи при цьому, що ковзання і переповзання дислокацій при крипі, їх енергія, поле напруг навколо них суттєво залежать від величини та знаку коефіцієнтів Пуассона.

Крім того, у малорозмірних об'єктах, таких як плівки, мікроконтакти, нанокристали, коефіцієнти Пуассона у значній мірі визначають і величину їх поверхневої енергії деформації [3].

Як відомо [4], In належить до неаксіяльно-акустичних матеріялів, значення і знак коефіцієнтів Пуассона яких змінюється в залежності від кристалографічного напрямку і від области температур, при якій відбувається деформація матеріялу. Дослідження в цій області лише розпочалися і потребують доповнення та аналізу впливу коефіцієнтів Пуассона на характер аномальної деформації реальних кристалів, зокрема індію, в процесі їх експлуатації в широкому інтервалі температур.

Тому нашою метою стало вивчення просторово-температурних розподілів коефіцієнтів Пуассона In у широкому інтервалі температур — від кріогенних до T_m та дослідження їх впливу на характер поведінки дефектів кристалічної будови при навантаженні.

2. ТЕМПЕРАТУРНО-ПРОСТОРОВІ РОЗПОДІЛИ ПРУЖНІХ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНДІЮ

Для тетрагональної синґонії головні коефіцієнти теплового розширення $\alpha_\perp = \alpha_{11} = \alpha_{22}$ і $\alpha_\parallel = \alpha_{33}$ описували через модулі пружньої

податливости (s_{ij}), компоненти тензора Ґрюнайзенових коефіцієнтів ($\gamma_\perp = \gamma_{11} = \gamma_{22}$ і $\gamma_\parallel = \gamma_{33}$), питому тепломісткість c_v і об'єм елементарної комірки V за відомими співвідношеннями [5]:

$$\alpha_\perp = [(s_{11} + s_{12})\gamma_\perp + s_{13}\gamma_\parallel]c_v/V, \tag{1}$$

$$\alpha_\parallel = [s_{33}\gamma_\parallel + 2s_{13}\gamma_\perp]c_v/V. \tag{2}$$

Компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона ν_{ij} розраховували через модулі пружньої податливости за загальним співвідношенням:

$$\nu_{ij} = -S_{ij}/S_{ii}, \tag{3}$$

які в різних кристалографічних напрямках для тетрагональних кристалів можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}\nu'_{ij} = -[&(\delta_{11}^2\delta_{21}^2 + \delta_{12}^2\delta_{22}^2)S_{11} + \delta_{13}^2\delta_{23}^2 S_{33} + (\delta_{11}^2\delta_{22}^2 + \delta_{12}^2\delta_{21}^2)S_{12} + \\ &+ (\delta_{11}^2\delta_{23}^2 + \delta_{13}^2\delta_{21}^2 + \delta_{12}^2\delta_{23}^2 + \delta_{22}^2\delta_{13}^2)S_{13} + (\delta_{12}\delta_{13}\delta_{22}\delta_{23} + \delta_{11}\delta_{13}\delta_{21}\delta_{23})S_{44} + \\ &+ (\delta_{11}\delta_{12}\delta_{21}\delta_{22})S_{66}] / [(\delta_{21}^4 + \delta_{22}^4)S_{11} + \delta_{23}^4 S_{33} + 2\delta_{21}^2\delta_{22}^2 S_{12} + (2\delta_{21}^2\delta_{23}^2 + \\ &+ 2\delta_{22}^2\delta_{23}^2)S_{13} + (\delta_{22}^2\delta_{23}^2 + \delta_{21}^2\delta_{23}^2)S_{44} + \delta_{21}^2\delta_{22}^2 S_{66}].\end{aligned} \tag{4}$$

Як відомо, модуль Юнґа визначається відношенням напруження σ до відносного видовження зразка у певному напрямку у кристалі. Для кристалів тетрагональної синґонії вираз для модулів Юнґа у будь-якому кристалографічному напрямку, визначений через компоненти тензора податливостей s_{ij}, має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}E'_i = 1 / [&(\delta_{11}^4 + \delta_{12}^4)S_{11} + 2\delta_{11}^2\delta_{12}^2 S_{12} + 2\delta_{13}^2(\delta_{11}^2 + \delta_{12}^2)S_{13} + \delta_{13}^4 S_{33} + \\ &+ (\delta_{12}^2\delta_{13}^2 + \delta_{11}^2\delta_{13}^2)S_{44} + \delta_{11}^2\delta_{12}^2 S_{66}].\end{aligned} \tag{5}$$

У співвідношеннях (4) і (5) δ_{ij} можна розрахувати так:

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \cos\varphi\cos\psi - \sin\varphi\cos\theta\sin\psi;\\ \delta_{12} &= \sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\cos\theta\sin\psi;\\ \delta_{13} &= -\sin\theta\sin\psi;\\ \delta_{21} &= -\cos\varphi\sin\psi - \sin\varphi\cos\theta\cos\psi;\\ \delta_{22} &= -\sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\theta\cos\psi;\\ \delta_{23} &= -\sin\theta\cos\psi.\end{aligned} \tag{6}$$

Величини δ_{11}, δ_{12}, δ_{13} визначають напрямок поздовжнього розтягування/стискання, а δ_{21}, δ_{22}, δ_{23} — напрямок поперечного ро-

зширювання/стискання [4]. Розрахунок полів напружень навколо крайової дислокації проводили за відомими співвідношеннями [6]. Для прямолінійної крайової дислокації у кристалі, для якої $x > 0$, $y > 0$, $z > 0$ можна записати наступні співвідношення для компонент тензора механічних напружень:

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = 0; \tag{7}$$

$$\sigma_{xx} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2}; \tag{8}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}; \tag{9}$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}; \tag{10}$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}). \tag{11}$$

У співвідношеннях (7)–(11) G — модуль зсуву, який для ізотропного середовища пов'язаний з модулем Юнґа співвідношенням $E = 2G(1 + \nu)$, ν — коефіцієнт Пуассона, який для індію змінюється в межах $-0{,}7 < \nu < 0{,}9$; b — модуль Бюрґерсового вектора дислокації.

Навколо ґвинтової дислокації компоненти тензора напружень задаються у залежності від кристалографічного напрямку залягання ґвинтової дислокації, співвідношеннями типу:

$$\sigma_{zx} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2}; \tag{12}$$

$$\sigma_{zx} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2}. \tag{13}$$

Як бачимо, поле напруг навколо ґвинтових дислокацій є циліндрично-симетричним і не містить коефіцієнтів Пуассона, тобто не залежить від структурного стану матеріялу (звичайного чи ауксетичного). Компоненти вектора зміщень навколо крайової дислокації розраховували за співвідношеннями [6]:

$$u_x = \frac{b}{2\pi}\left[\operatorname{arctg}\frac{y}{x} + \frac{xy}{2(1-\nu)(x^2 + y^2)}\right]; \tag{14}$$

$$u_y = -\frac{b}{2\pi}\left[\frac{1-2\nu}{4(1-\nu)}\ln(x^2 + y^2) + \frac{x^2 - y^2}{4(1-\nu)(x^2 + y^2)}\right]. \tag{15}$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У даній роботі ми вперше дослідили просторово-температурні розподіли компонент тензора коефіцієнтів Пуассона ν_{ij} індію вище 300 К (до 429,7 К), використовуючи дані температурних залежностей пружніх податливостей s_{ij}, представлених в [7].

Аналіз температурних залежностей ν_{ij} показав, що існують як мінімум чотири інтервали температур: 0–75 К, 75–200 К, 200–300 К, 300–429 К, в яких коефіцієнти Пуассона індію змінюють знак і характер поведінки $\partial\nu/\partial T$ з температурою. Так, коефіцієнт ν_{12} є від'ємним лише в інтервалі 2–15 К, коефіцієнт $\nu_{[101]}^{[-101]}$ стає від'ємним вище 260 К, а $\nu_{[110]}^{[-110]}$ менший за нуль на всьому інтервалі температур (рис. 1). Зазначимо різний характер температурних залежностей ν_{ij} в різних кристалографічних напрямках: три компоненти ($\nu_{[101]}^{[-101]}$; $\nu_{[110]}^{[-110]}$ та ν_{31}) зменшуються з ростом температури, одна ν_{12} зростає, а компонента ν_{13} є температурно-незалежною. Відзначимо також суттєву нелінійність майже всіх компонент тензора ν_{ij} вище 350 К, що може бути результатом значного розм'якшування модулів пружности індію за рахунок росту концентрації пар «міжвузловий атом–вакансія» при наближенні до температури топлення [8].

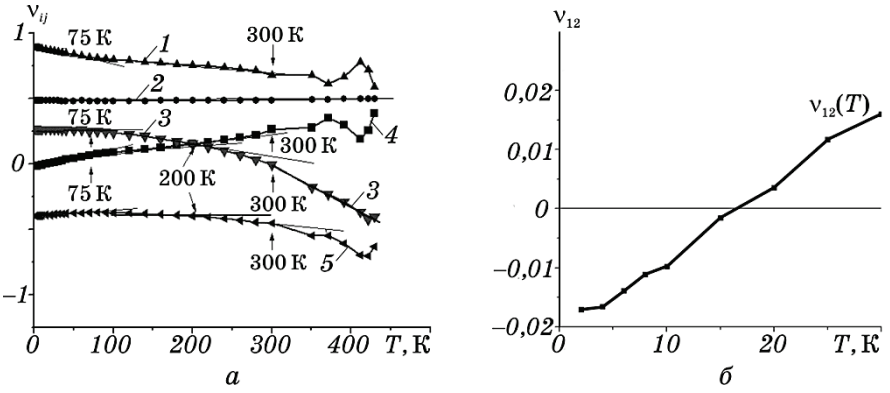

Рис. 1. Температурні залежності компонент тензора коефіцієнтів Пуассона для In: *1* — ν_{31}, *2* — ν_{13}, *3* — $\nu_{[101]}^{[-101]}$, *4* — ν_{12}, *5* — $\nu_{[110]}^{[-110]}$ (*а*); ν_{12} в інтервалі 2–25 К (*б*).

Fig. 1. Temperature dependences of the components of the Poisson coefficient tensor for In: *1*—ν_{31}, *2*—ν_{13}, *3*— $\nu_{[101]}^{[-101]}$, *4*—ν_{12}, *5*— $\nu_{[110]}^{[-110]}$ (*а*); ν_{12} in the range of 2–25 K (*б*).

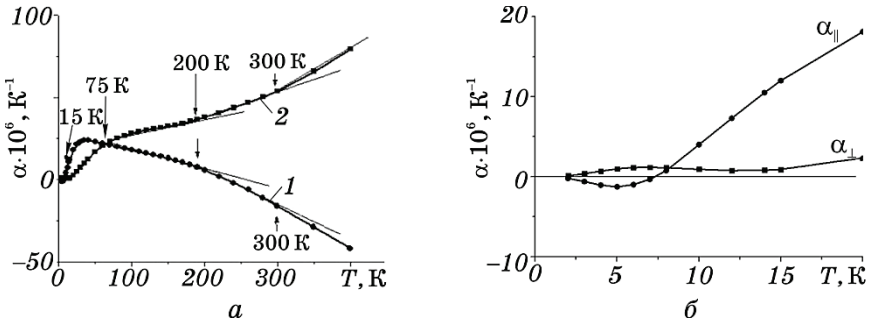

Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнтів термічного розширення для In: *1* — $\alpha_{\parallel}$, *2* — $\alpha_{\perp}$ (*а*), α_{ij} в інтервалі 2–25 К (*б*).

Fig. 2. Temperature dependences of the thermal expansion coefficients for In: *1*—$\alpha_{\parallel}$, *2*—$\alpha_{\perp}$, α_{ii} in the range of 2–25 K (*б*).

Аналогічний характер зміни з температурою мають і лінійні коефіцієнти термічного розширення для індію α_{ij} (рис. 2) [2]. Як бачимо, на кривих $\alpha_{ij}(T)$ спостерігаються ті ж характерні області температур. В інтервалі 2–75 К, на кривій залежности $\alpha_{\parallel}(T)$ можна відзначити екстремуми та інверсію знаку α_{33} з від'ємного на додатний (при $T < 7$ К). Цю аномалію автори [2] пов'язали з переходом індію з надпровідного стану у звичайний ($T_c = 3{,}37$ К). При 75 К $\alpha_{\perp} = \alpha_{11} = \alpha_{22}$ і $\alpha_{\parallel} = \alpha_{33}$ стають рівними, і матеріял у дуже вузькому інтервалі температур втрачає анізотропність теплового розширення, але з підвищенням температури до 200 К вони продовжують лінійно змінюватись, однак з різними за знаком температурними коефіцієнтами $\partial\alpha/\partial T$. Відзначимо, що коефіцієнт $\alpha_{\parallel}$ в інтервалі 200–300 К знову стає від'ємним і залишається таким аж до T_m. Таку надзвичайну залежність параметрів теплового розширення від температури можна пояснити специфічним співвідношенням між пружніми податливостями s_{ij} цього металу та зміною його фононного спектру, яка може бути викликана як зміною температури, так і структурним станом реального кристалу.

Для індію s_{13} має значення, майже рівне за величиною і протилежне за знаком значенням $(s_{11} + s_{12})$ і $(1/2s_{33})$. Тому величина і знак α_1 та $\alpha_{\parallel}$ дуже чутливі до найменших змін $\gamma_{\perp}$ і $\gamma_{\parallel}$, а, отже, і до найменших змін фононного спектру $\gamma_i = -d(\ln\nu_i)/d(\ln V)$ [5]. Так само реагують на зміну фононного спектру і компоненти тензора коефіцієнтів Пуассона. В інтервалі 200–429 К стає від'ємним коефіцієнт $\nu_{[101]}^{[-101]}$ і $\alpha_{\parallel}$, а ν_{12} зростає з температурою аналогічно до $\alpha_{\perp}$. Із сказаного стає очевидним, що і коефіцієнти термічного розширення, і коефіцієнти Пуассона є результатом одних і тих же про-

цесів — ангармонізму теплових коливань атомів у реальному кристалі.

Про те, що фононний спектр індію впливає на характер зміни з температурою його деформації, до певної міри свідчать і дані рис. 3, на якому зображено температурні залежності характерис-

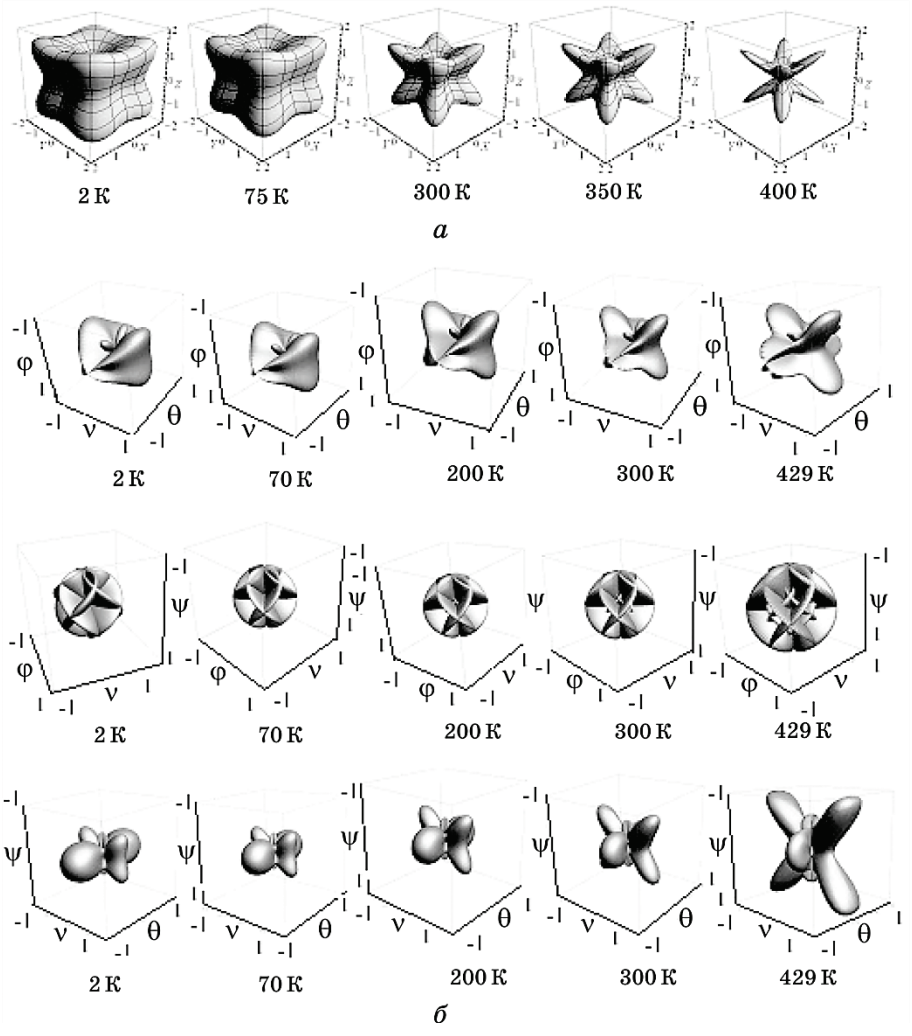

Рис. 3. Характеристичні поверхні модулів Юнґа (*а*) та коефіцієнтів Пуассона (*б*) у напрямку <100>, <010>, <001> відповідно, в широкому інтервалі температур.

Fig. 3. Characteristic surfaces of Young modules (*a*) and Poisson coefficients (*б*) in the direction <100>, <010>, <001>, respectively, over a wide temperature range.

тичної поверхні модуля Юнґа (рис. 3, *а*) і коефіцієнтів Пуассона у різних кристалографічних напрямках (рис. 3, *б*). Як бачимо, просторові розподіли модуля E і коефіцієнтів ν_{ij} у напрямку <100> і <001> мають схожий характер, а розподіл коефіцієнтів у напрямку <010> свідчить про слабку залежність нелінійної деформації від температури (рис. 1, *а*; крива *2*).

Кількісна аналіза компонент тензора коефіцієнтів Пуассона в різних кристалографічних напрямках при різних температурах показує, що значення ν_{ij} індію змінюються в широкому інтервалі від аномально великого 0,9 до –0,7 (рис. 1, *б*).

Це дозволяє припустити, що поля напружень навколо дефектів кристалічної будови, зокрема крайових дислокацій будуть суттєво залежати не тільки від температури, але й від напрямку в кристалі, та від того є цей напрямок ауксетичним, чи ні (рис. 4).

Оцінки показують, що значення компонентів тензора напружень навколо крайових дислокацій в ауксетичному і неауксетичному станах можуть відрізнятись майже на порядок: так, при 300 К $\sigma_{xx\text{звич}}/\sigma_{xx\text{аукс}} = 6$ (разів), а отже, і деформаційні властивості, які визначаються взаємодією дефектів, також будуть суттєво різними за величиною, а в деяких напрямках і за знаком (рис. 4 і 5).

Менші значення напружень поблизу «ауксетичних дислокацій», як наслідок, будуть сприяти слабшому гальмуванню цих дислокацій точковими дефектами, через ослаблення їх взаємодії, а, отже, модифікуватимуть пластичність матеріялу саме в цьому напрямі.

Таким чином, врахування величини і знаку коефіцієнтів Пуассона (особливо для малорозмірних об'єктів з індію) уможливить більш коректно моделювати поля напружень і деформацій, які

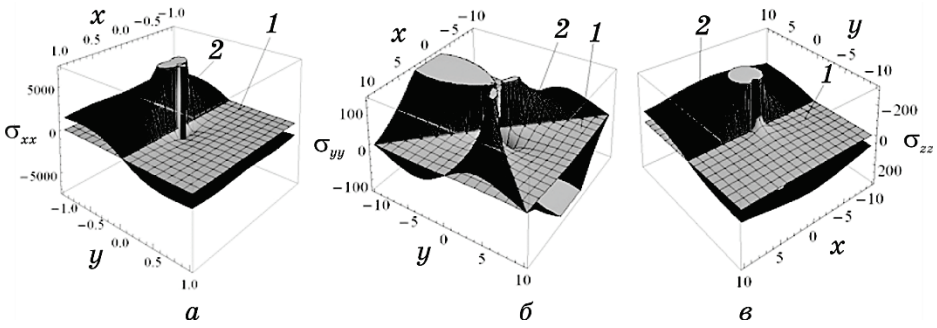

Рис. 4. Компоненти тензора механічних напружень навколо крайової дислокації в ауксетичному (*1*) і неауксетичному (*2*) індії: *а* — σ_{xx}, *б* — σ_{yy}, *в* — σ_{zz}.

Fig. 4. Components of the tensor of mechanical stress around the edge dislocation in auxetic (*1*) and non-auxetic (*2*) indium: *а*—σ_{xx}, *б*—σ_{uu}, *в*—σ_{zz}.

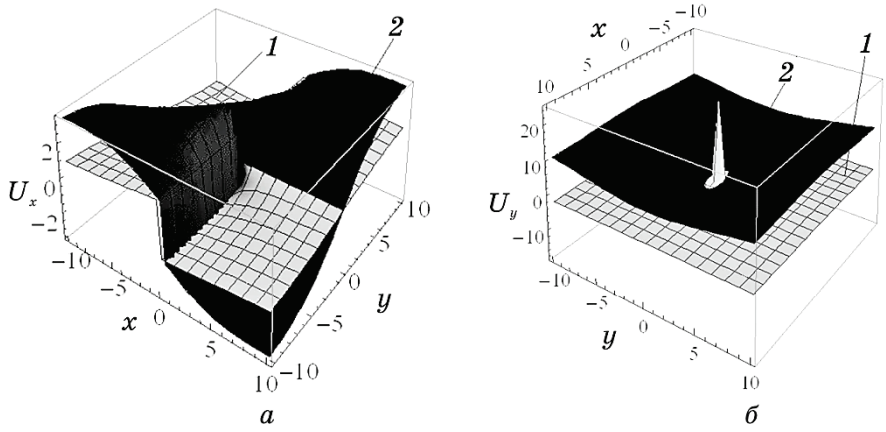

Рис. 5. Компоненти вектора зміщень поблизу крайової дислокації в ауксетичному (*1*) і неауксетичному (*2*) індії: *а* — U_x, *б* — U_y.

Fig. 5. Components of the displacement vector near the edge dislocation in the auxetic (*1*) and non-auxetic (*2*) indium: *а*—U_x, *б*—U_y.

виникають у них при експлуатації, та прогнозувати їх поведінку в процесі кріоциклювання.

4. ВИСНОВКИ

1. Розраховано та візуалізовано температурно-просторові розподіли коефіцієнтів Пуассона в індії у широкому інтервалі температур — від кріогенних до температури топлення.
2. Встановлена задовільна кореляція температурних залежностей коефіцієнтів Пуассона і лінійних коефіцієнтів термічного розширення в цьому матеріялі, яку можна пояснити спільною «ангармонічною» природою досліджуваних характеристик.
3. Показано, що лінійні дефекти в індії в ауксетичному стані у порівнянні із звичайним оточені істотно меншими за величиною, а в певних напрямках і з протилежним знаком, полями напруг, що може виявитись вирішальним при прогнозуванні механічних властивостей цього матеріялу.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. X. Cheng, C. Liu, and V. V. Silberschmidt, *Comput. Mater. Sci.*, **52**, Iss. 1: 274 (2012).
2. J. G. Collins, J. A. Cowan, and G. K. White, *Cryogenics*, **8**, Iss. 1–4: 219 (1967).
3. Т. П. Сушкова, Г. В. Семенова, Е. Ю. Кононова, *Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация*, № 2: 60 (2011).

4. М. Паранський, В. Балазюк, М. Гунько, *Явище ауксетичності в твердих тілах* (Чернівці: Арт: 2016).
5. С. И. Новикова, *Тепловое расширение твёрдых тел* (Москва: Наука: 1974).
6. Дж. Хирт, И. Лоте, *Теория дислокаций* (Москва: Атомиздат: 1972) (пер. с англ.).
7. C. L. Vold, M. E. Glicksman, E. W. Kammer, and L. C. Cardinal, *J. Phys. Chem. Solids*, **38**, Iss. 2: 157 (1977).
8. Е. В. Гончарова, А. С. Макаров, Р. А. Кончаков, Н. П. Кобелев, В. А. Хоник, *Письма в ЖЭТФ*, **106**, вып. 1: 39 (2017).

REFERENCES

1. X. Cheng, C. Liu, and V. V. Silberschmidt, *Comput. Mater. Sci.*, **52**, Iss. 1: 274 (2012).
2. J. G. Collins, J. A. Cowan, and G. K. White, *Cryogenics*, **8**, Iss. 1–4: 219 (1967).
3. T. P. Sushkova, G. V. Semenova, and E. Yu. Kononova, *Vestnik VGU. Ser. Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, No. 2: 60 (2011) (in Russian).
4. M. Raranskyy, V. Balazyuk, and M. Hunko, *Yavyshche Auksetychnosti v Tverdykh Tilakh* (Chernivtsi: Art: 2016) (in Ukrainian).
5. S. I. Novikova, *Teplovoe Rasshirenie Tverdykh Tel* (Moscow: Nauka: 1974) (in Russian).
6. J. Hirth and J. Lothe, *Teoriya Dislokatsiy* (Moscow: Atomizdat: 1972) (Russian translation).
7. C. L. Vold, M. E. Glicksman, E. W. Kammer, and L. C. Cardinal, *J. Phys. Chem. Solids*, **38**, Iss. 2: 157 (1977).
8. E. V. Goncharova, A. S. Makarov, R. A. Konchakov, N. P. Kobelev, and V. A. Khonik, *Pisma v ZhETF*, **106**, Iss. 1: 39 (2017) (in Russian).