

УДК 669-176:539.3+539.4+539.5

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.142.1085

## ПАРАМЕТРИ ТЕКСТУРИ КЕРНСА ТА ВЛАСТИВОСТІ ГЕКСАГОНАЛЬНИХ МОНО- ТА ПОЛІКРИСТАЛІВ

УСОВ В. В.<sup>1</sup>, *докт. фіз.-мат. наук., проф.*,  
ШКАТУЛЯК Н. М.<sup>2</sup>, *канд. фіз.-мат. наук, доц.*,  
ІОВЧЕВ С. І.<sup>3\*</sup>, *канд. фіз.-мат. наук, доц.*

<sup>1</sup> Кафедра технологічної та професійної освіти, Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, вул. Старопортофранківська, 26, 65020, Одеса, Україна, тел. +38 (066) 352-90-92, e-mail: [valentinusov67@gmail.com](mailto:valentinusov67@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7855-5370

<sup>2</sup> Кафедра прикладної математики та інформатики, Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, вул. Старопортофранківська, 26, 65020, Одеса, Україна, тел. +38 (066) 985-24-35, e-mail: [shkatulyak56@gmail.com](mailto:shkatulyak56@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-4905-001X

<sup>3\*</sup> Кафедра математики, фізики та астрономії, Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, 65029, Одеса, Україна, тел. +38 (096) 107-19-99, e-mail: [iovchevodessa@gmail.com](mailto:iovchevodessa@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-3161-8087

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Фізико-механічні властивості полікристалів визначаються відповідними властивостями монокристалів (кристалітів), що складають полікристал, та розподілом останніх за орієнтацією в полікристалі (текстурою). У металів із гексагональною структурою використання параметрів текстури Кернса, що показують ступінь збігу гексагональної осі кристалітів із заданим напрямком у полікристалічному зразку, дозволяє визначити властивість полікристала у цьому напрямку, якщо відомі властивості монокристала у напрямку його гексагональної осі та перпендикулярному напрямку. Можливе також розв'язання зворотної задачі: визначення властивостей монокристала у напрямку його гексагональної осі та перпендикулярному напрямку за даними властивостей полікристала та визначеними параметрами текстури Кернса. *Матеріали та методи.* Досліджували пружні та механічні характеристики гексагональних сплавів на основі титану (Grade 1 і VT1-0) і магнію (Mg–10 % Li і ZE10) після різних типів деформації – вальцювання, попереминого згинання і гвинтової екструзії. Параметри текстури Кернса визначали рентгенівським методом за даними побудови обернених полюсних фігур (ОПФ) напрямку нормалі (НН) до площини листів та напрямку вальцювання (НВ). *Результати експерименту.* Показано, що вказаний метод дозволяє розраховувати пружні та механічні властивості зазначених полікристалів після проходження ними різних видів деформації з похибкою не більше 5–10 %, а також розв'язувати обернену задачу розрахунку властивостей монокристалів із похибкою не більше 5 %. *Висновки.* Використання параметрів текстури Кернса та характеристик монокристалів магнієвих сплавів ZE10, Mg 5 % Li, титану Grade1 і VT1-0 дозволило розрахувати відповідні властивості полікристалів та їх анізотропію. Використання параметрів текстури Кернса, експериментальних значень модуля пружності, меж міцності та плинності полікристалічних листів досліджуваних магнієвих і титанових сплавів дозволило оцінити характеристики. Між значеннями модуля пружності, механічними характеристиками досліджуваних листів магнієвих і титанових сплавів, з одного боку, та відповідними параметрами текстури Кернса, з іншого боку, існують сильні кореляційні зв'язки.

**Ключові слова:** *гексагональні полікристали; параметри текстури Кернса; вальцювання; знакозмінний вигин; гвинтова екструзія; модуль Юнга; механічні властивості*

## KEARNS TEXTURE PARAMETERS AND PROPERTIES OF HEXAGONAL MONO- AND POLYCRYSTALS

USOV V.V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Phys. and Math.), Prof.*,  
SHKATULYAK N.M.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Phys. and Math.), Assoc. Prof.*,  
IOVCHEV S.I.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Phys. and Math.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Technological and Professional Education, South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, 26, Staroportofrankivska St., Odesa, 65020, Ukraine, tel. +38 (066) 352-90-92, e-mail: [valentinusov67@gmail.com](mailto:valentinusov67@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7855-5370

<sup>2</sup> Department of Applied Mathematics and Informatics, South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, 26, Staroportofrankivska St., Odesa, 65020, Ukraine, tel. +38 (066) 985-24-35, e-mail: [shkatulyak56@gmail.com](mailto:shkatulyak56@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-4905-001X

<sup>3\*</sup> Department of Mathematics, Physics and Astronomy, Odesa National Maritime University, 34, Mechnikov St., Odesa, 65029, Ukraine, tel. +38 (096) 107-19-99, e-mail: [ioychevodessa@gmail.com](mailto:ioychevodessa@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-3161-8087

**Abstract. Problem statement.** Polycrystals' physical and mechanical properties are determined by the corresponding properties of single crystals (crystallites) that make up the polycrystal, and their distribution by orientation in the polycrystal (texture). In metals with a hexagonal structure, the use of Kearns texture parameters, which show the degree of coincidence of the hexagonal axis of crystallites with a given direction in a polycrystalline sample, allows determining the property of a polycrystal in this direction, if the properties of a single crystal in the direction of its hexagonal axis and the perpendicular direction are known. It is also possible to solve the inverse problem: determining the properties of a single crystal in the direction of its hexagonal axis and the perpendicular direction based on the properties of the polycrystal and the determined of the Kearns texture parameters. **Materials and methods.** Elastic and mechanical characteristics of hexagonal alloys based on titanium (Grade 1 and VT1-0) and magnesium (Mg – 10 % Li and ZE10) were studied after different types of deformation – rolling, alternating bending, and twist extrusion. The Kearns texture parameters were determined by the X-ray method based on the data of the construction of inverse pole figures (IPF) in the normal direction (ND) to the sheets plane and the rolling direction (RD). **The results of the experiment.** It is shown that the specified method allows to calculate the elastic and mechanical properties of the specified polycrystals after they undergo various types of deformation with an error of no more than 5–10 %, as well as to solve the inverse problem of calculating the properties of single crystals with an error of no more than 5 %. **Conclusions.** Using the parameters of the Cairns texture and the characteristics of single crystals of magnesium alloys ZE10, Mg 5 % Li, titanium Grade1 and VT1-0 made it possible to calculate the corresponding properties of polycrystals and their anisotropy. The use of Cairns texture parameters, experimental values of the modulus of elasticity, tensile strength and yield strength of polycrystalline sheets of the studied magnesium and titanium alloys made it possible to evaluate the characteristics. There are strong correlations between the values of the modulus of elasticity, the mechanical characteristics of the studied sheets of magnesium and titanium alloys, on the one hand, and the corresponding parameters of the Cairns texture, on the other hand.

**Keywords:** *hexagonal polycrystals; Kearns texture parameters; rolling, alternating bending; twist extrusion; Young's modulus; mechanical properties*

**Вступ.** Використання металевих виробів і заготовок визначається їх якістю після виготовлення. Тому дослідження впливу зовнішніх чинників на створення напівфабрикатів із найкращими якістьми актуальне. Анізотропія фізико-механічних властивостей полікристалічних металів зумовлена типом текстури (кристалографічної та механічної). З одного боку, ігнорування текстури металу може спричинити невідповідні результати або передчасне руйнування будівель і виробів (наприклад, утворення гребінців або фестонів під час глибокої витяжки чи штампування).

У цьому дослідженні оцінювали фізико-механічні характеристики різних сплавів із гексагональною структурою на основі магнію (Mg–10 % Li і ZE10) і титану (Grade 1 і VT1-0) після вальцювання, поперемінного згинання (ПЗ), гвинтової екструзії (ГЕ) та термічної обробки. Оцінка базувалася на використанні текстурних параметрів Кернса (які відображають ступінь збігу гексагональної осі кристалічної комірки зерен із певним

геометричним напрямком у полікристалічному зразку) та характеристик відповідних монокристалів. Також можна оцінити властивості монокристалів за інформацією про еквівалентні властивості полікристалів, що є так званим зворотним питанням.

Часто перед використанням необхідно випрямити листовий і рулонний метал за допомогою роликів правильних машин [1]. Це знижує внутрішні напруження металу та надає йому необхідних площинних властивостей, що поліпшує якість кінцевого продукту.

Під час правки матеріал піддається поперемінному згинанню (ПЗ), що змінює механічні властивості та структурний склад металу, незважаючи на відносно незначну пластичну деформацію розтягування та стиснення. Зокрема, розвиваються та накопичуються неконтрольовані мікротріщини та мікропори, що змінює характеристики металу. Однак недостатньо досліджень щодо того, як поперемінне згинання впливає на анізотропію фізико-механічних характеристик.

Значним резервом підвищення експлуатаційних якостей металевих матеріалів стало застосування інноваційних технологій інтенсивної пластичної деформації (ПД) [2]. Для досягнення масивних деформацій використовуються такі методи як гвинтова екструзія (ГЕ), кручення під високим гідростатичним тиском (КГТ), рівноканальне кутове пресування (РККП), всебічне кування (УК) та інші. Ці методи передбачають багаторазове піддавання оброблених матеріалів інтенсивній пластичній деформації зсуву.

Застосування технологій ПД дозволяє виготовляти металеві матеріали з об'ємними нано- або субмікроструктурними (СМК) структурами. Ці матеріали відрізняються від існуючих металів і сплавів у звичайному крупнозернистому стані комплексом фізико-механічних і технологічних властивостей, що сприятливо підвищують характеристики міцності. Розмір структурних елементів (насамперед зерен і субзерен) у цих матеріалах становить близько 100–200 нм.

Ці характеристики включають помітне збільшення міцності та твердості при збереженні високого рівня пластичності. Однак недостатньо досліджень було проведено щодо формування кристалографічної текстури в СМК-матеріалах або як вона впливає на характеристики зернистого стану, значно підвищуючи міцність.

**Мета роботи** – показати можливості визначення фізико-механічних властивостей полікристалічних сплавів із гексагональною структурою на основі магнію (ZE10, Mg–5 % Li) та титану (Grade 1, VT1-0) за параметрами текстури Кернса та властивостями відповідних монокристалів, а також розв'язання зворотної задачі – визначення властивостей монокристалів досліджуваних сплавів, за даними вимірювань відповідних властивостей полікристалічних зразків та параметрами текстури Кернса.

**Матеріали та методика.** Матеріалом для дослідження слугували сплави на основі

магнію і титану з гексагональною структурою.

Досліджувалися листи з магнієвого сплаву ZE10 (1,3 % Zn, 0,15 % Zr і 0,2 % рідкоземельних металів (РЗМ), серед РЗМ переважно церій) у стані як отримано [3] і після подальшого поперемінного згинання на 0,5; 1,0; 3,0 і 5,0 циклів.

Магнієвий сплав Mg–5 % Li (мас.) досліджували після таких процесів: 1) пресування через прямокутну матрицю за 350 °C і подальшого вальцювання з проміжним нагріванням до 350 °C товщиною 4 мм; 2) подальше вальцювання зі зміною напрямку вальцювання на 90° з проміжним нагріванням до 350 °C через кожний прохід до товщини 1 мм; 3) подальше почергове згинання листів товщиною 1 мм на 0,5, 1,0, 3,0 і 5,0 циклів.

Поперемінне згинання смуг 100×100 мм сплавів здійснювали за допомогою спеціально розробленого інструменту на валику діаметром 50 мм. Швидкість деформації становила  $\sim 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ , а рух металу під час згинання становив  $\sim 150 \text{ мм/с}$ .

Титановий сплав VT1-0 досліджували після п'яти проходів гвинтової екструзії, а також після додаткового годинного ізохронного вакуумного відпалу за температур 200, 250, 300, 350 і 400 °C.

**Вимірювання модуля Юнга.** Початкові листи та листи після необхідної кількості циклів поперемінного згинання (ПЗ) нарізали з інтервалами 15° від НВ до ПН для отримання набору із семи прямокутних зразків, кожен розміром 100×10 мм. Використовуючи динамічний метод [4] і частоту власних згинальних коливань зразка, знайшли модуль Юнга. Похибка вимірювання не перевищувала 1 % [4].

Випробування на одноосьовий розтяг здійснювали, дотримуючись стандартних процедур для проведення на машинах для розтягування Zwick Z250/SN5A та INSTRON 8801. Для механічних випробувань у напрямку вальцювання (НВ), діагональному напрямку (ДН) – під кутом 45° до НВ та поперечному напрямку (ПН) вирізали три серії зразків із вихідного листа та листів після поперемінного згинання на

0,5; 1,0; 3,0 і 5,0 циклів, а також зразки для дослідження текстури і структури.

За допомогою методу рентгенівської дифрактометрії з фокусуванням за Бреггом-Брентано побудовано обернені полюсні фігури (ОПФ) від нормального напрямку (НН) і напрямку вальцювання (НВ) для дослідження кристалографічної текстури [5]. Для побудови ОПФ від НВ з тонких листів зразки були набрані у вигляді пучка смужок шириною 3 мм, вирізаних із листів і скріплених разом. Хімічне полірування використовувалося для видалення шару поверхневих спотворень товщиною 0,1 мм, щоб запобігти негативному впливу на текстуру зразків.

Зразки без текстури виготовили з дрібної рекристалізованої тирси досліджуваних металів. Полюсні фігури зразків після відповідної кількості циклів попереминого згинання знімали з обох сторін листів. Відповідні ОПФ побудовано з використанням даних рентгенівської дифракції досліджуваних сплавів і відповідних стандартів у відфільтрованому  $K_{\alpha}$ Mo випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-3м.

Полюсну густину розраховували, використовуючи інтегральну інтенсивність ліній досліджуваних зразків, поділену на інтенсивність відповідних дифракційних ліній еталонного зразка. ОПФ були побудовані з використанням даних нормалізації Морріса [6].

**Використання параметрів текстури Кернса для оцінення властивостей гексагональних полікристалів.** Орієнтація нормалі до ізотропної площини системи координат зразка визначає внесок у загальні характеристики полікристала в тому чи іншому кристалографічному напрямку. Це вісь  $c$  гексагонального кристала, або [0001]. Обертання кристалів навколо цієї осі не впливає на анізотропію характеристик. Перпендикуляр до осі [0001] – вісь  $a$ . Кернс продемонстрував [7], що властивість гексагонального полікристала в заданому напрямку  $P(\varphi_i)_{\text{ref}}$  залежить від кута [0001] між даним напрямком і напрямком кристала, від характеристики монокристала

вздовж осі  $c$  ( $P_c$ ) та осі  $a$  ( $P_a$ ), а також параметрів текстури  $f_j$ , відповідно до такого співвідношення:

$$P(\varphi_i)_{\text{ref}} = f_j P_c + (1 - f_j) P_a. \quad (1)$$

У формулі (1):

$$f_j = \langle \cos^2 \varphi_i \rangle_j = \sum A_i P_{ji} \cos^2 \varphi_i,$$

де:  $P_{ji} = \frac{I_i / I_R}{\sum_{\Delta} (A_i (I_i / I_R))}$ ;  $I_i / I_R$  – відношення

інтегральної інтенсивності  $i$ -го рефлексу на  $j$ -й ОПФ до відповідного значення інтенсивності рефлексу зразка без текстури  $I_R$ ;  $A_i$  – статистичні ваги  $i$ -го рефлексу ( $\sum A_i P_{ji} = 1$ ) [6]. Умовно  $A_i$  обчислюється як відсоток площі поверхні стереографічного трикутника навколо нормалі до  $i$ -го рефлексу відповідної ОПФ.

Параметр текстури Кернса для заданого напрямку полікристалічного зразка можна визначити з ОПФ трьох головних напрямків листового матеріалу (напрямку нормалі до площини листа (ОПФ НН), напрямку вальцювання (ОПФ НВ) і поперечного напрямку листа (ОПФ ПН)), відповідно,  $f_{\text{НН}}$ ,  $f_{\text{НВ}}$ ,  $f_{\text{ПН}}$ . У цьому випадку сума параметрів  $f_j$  за трьома основними напрямками листового матеріалу з гексагональною ґраткою повинна дорівнювати одиниці. Якщо значення параметрів  $f_j$  дорівнює 1/3 в кожному з основних напрямків листа, це свідчить про ізотропність властивостей.

Отже, знаючи два з трьох параметрів Кернса (наприклад, якщо ми визначили  $f_{\text{НН}}$  та  $f_{\text{НВ}}$ ), третій параметр  $f_{\text{ПН}}$  можна знайти з рівняння:

$$f_{\text{НН}} + f_{\text{НВ}} + f_{\text{ПН}} = 1. \quad (2)$$

Методи визначення параметрів текстури Кернса за прямими та оберненими полюсними фігурами детально описано в [7].

**Результати експерименту.**

**Пружні властивості листів зі сплавом ZE10 на основі параметрів текстури Кернса.** Для визначення параметрів текстури Кернса сплаву магнію ZE10 скористаємось ОПФ, показаними на рисунку 1. Параметри текстури Кернса  $f_{\text{НН}}$ ,

$f_{НВ}$  та  $f_{ПН}$  визначали за формулами (1) і (2). Параметри текстури Кернса наведені в таблиці 1.

Аналіз розподілу полюсної густини на ОПФ НН протилежних сторін листів після різної кількості циклів ПЗ показав певні невідповідності (рис. 1, в, г; е, ж; і, к; л, м). Причина цих розбіжностей полягає в тому, що при згинанні в один бік шари металу на опуклому боці листа піддаються деформації розтягування. При цьому відповідні металеві шари на увігнутому боці листа деформуються стисненням.

Ці невідповідності відображаються на значеннях параметрів текстури Кернса,

розрахованих на основі ОПФ НН протилежних боків листів після ПЗ ( $f_{НН}^{(1)}$  і  $f_{НН}^{(2)}$ , табл. 1).

Таблиця 1

**Параметри текстури Кернса сплаву магнію ZE10 у вихідному стані та після різного числа циклів поперемінного згинання (ПЗ)**

Число циклів, n	Параметри текстури Кернса				
	$f_{НН}^{(1)}$	$f_{НН}^{(2)}$	$f_{НН}^{(сп)}$	$f_{НВ}$	$f_{ПН}$
0	0,340	0,340	0,340	0,176	0,484
0.5	0,322	0,324	0,323	0,203	0,474
1.0	0,322	0,318	0,320	0,208	0,472
3.0	0,326	0,306	0,316	0,217	0,467
5.0	0,323	0,315	0,319	0,153	0,528

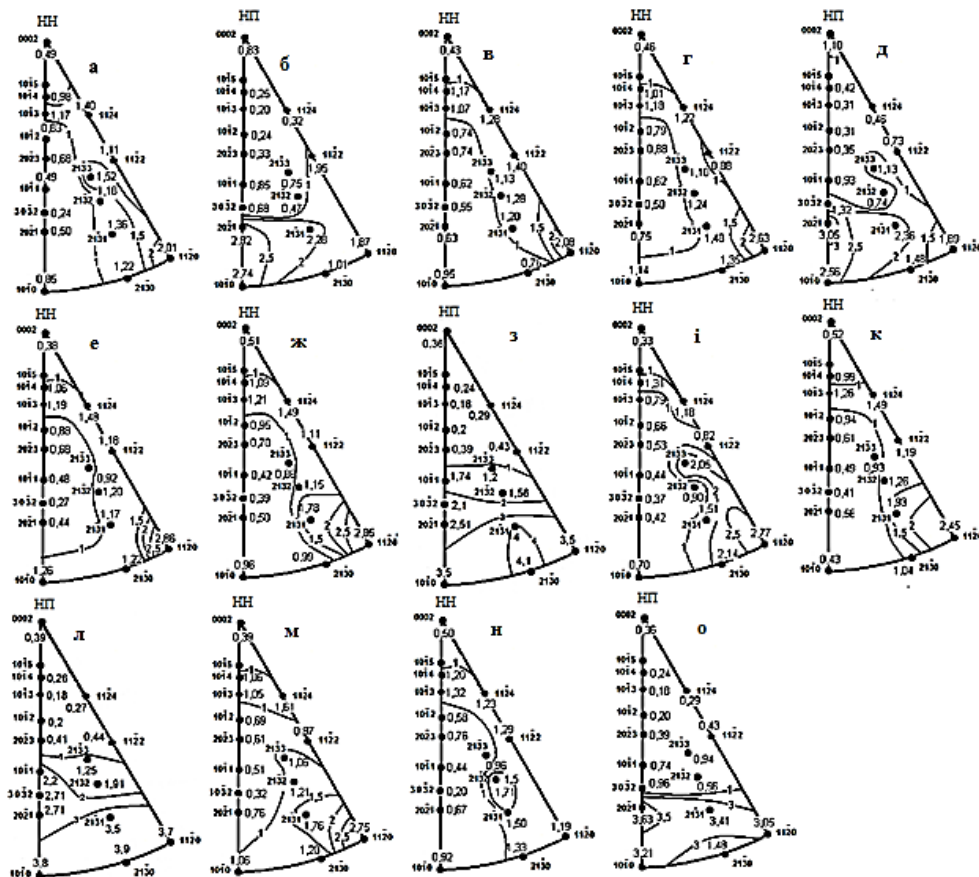


Рис. 1. Експериментальні ОПФ сплаву ZE10: (а, б) – вихідний лист; (в–д) – вигин 0,5 циклу; (е–з) – вигин 1 цикл; (і–л) – вигин 3 цикли; (м–о) – вигин 5 циклів; (г, ж, і, н) – розтягнутий бік листів; (в, д, з, м) – стислий бік листів

Для подальшого аналізу впливу ПЗ на властивості досліджуваного сплаву в НН до площини листа використовували параметри текстури Кернса, усереднені по обох боках листів після відповідної кількості циклів ПЗ ( $f_{НН}^{(сп)}$ ). Для теоретичної оцінки модулів пружності сплаву ZE10 необхідні значення

пружних сталей сплаву. Згідно з роботою [8]  $s_{33}^{-1} = E_c = 45,1$  ГПа ;  $s_{11}^{-1} = E_a = 43,7$  ГПа . Модулі Юнга експериментальні ( $E_{НВ}^{експ}$ ,  $E_{ПН}^{експ}$ ) та розраховані за співвідношенням (1) ( $E_{НВ}^{розра}$ ,  $E_{ПН}^{розра}$ ) листів зі сплаву ZE10 наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Експериментальні та розрахункові модулі пружності після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10**

Число циклів ЗВ, n	$E_{НВ}^{експ}$ , ГПа	$E_{НВ}^{розн}$ , ГПа	$\Delta E_{НВ} / E_{НВ}^{експ}$ , %	$E_{ПН}^{експ}$ , ГПа	$E_{ПН}^{розн}$ , ГПа	$\Delta E_{ПН} / E_{ПН}^{експ}$ , %	$E_{ПН}^{розн}$ , ГПа
0	46,3	43,9	5,2	43,9	44,4	-1,1	44,2
0.5	46,0	44,0	4,3	43,8	44,4	-1,4	44,2
1.0	45,8	44,0	3,9	43,5	44,0	-1,1	44,2
3.0	45,0	44,1	2,0	43,3	44,4	-2,5	44,2
5.0	44,8	44,0	1,8	43,3	44,5	-2,8	44,2

Як видно з таблиці 2, розрахунковий модуль  $E$  відрізняється від експериментального не більше ніж на 5,2 %.

**Пружні властивості магнієвого сплаву Mg-5 % Li (мас.).** Обернені полюсні фігури магнієвого сплаву Mg-5 % Li (мас.) показані на рисунку 2.

Параметри текстури Кернса розраховані на основі ОПФ НН ( $f_{НН}$ ) та ОПФ НВ ( $f_{НВ}$ ) з даних на рисунку 2, а також  $f_{ПН}$ , розраховані за співвідношенням (2), наведені в таблиці 3. Оскільки на ОПФ НН листів для протилежних боків після поперемінного згинання (рис. 2) є певні розбіжності в розподілі полюсної густини (як у випадку зі сплавом ZE10), використовували параметри

текстури Кернса, усереднені по обох боках листів після відповідної кількості циклів ПЗ  $f_{НН}^{(ср)}$  для подальшого аналізу.

Таблиця 3

**Параметри текстури Кернса сплаву Mg – 5 % Li**

	Число циклів, n	Параметри текстури Кернса				
		$f_{НН}^{(1)}$	$f_{НН}^{(2)}$	$f_{НН}^{(ср)}$	$f_{НВ}$	$f_{ПН}$
Після екструзії	-	0,239	0,239	0,239	0,114	0,647
Після ПЗ	0	0,390	0,390	0,390	0,393	0,217
	0,5	0,435	0,407	0,421	0,224	0,355
	1,0	0,409	0,388	0,399	0,188	0,391
	3,0	0,399	0,411	0,404	0,289	0,407
	5,0	0,417	0,411	0,414	0,144	0,442

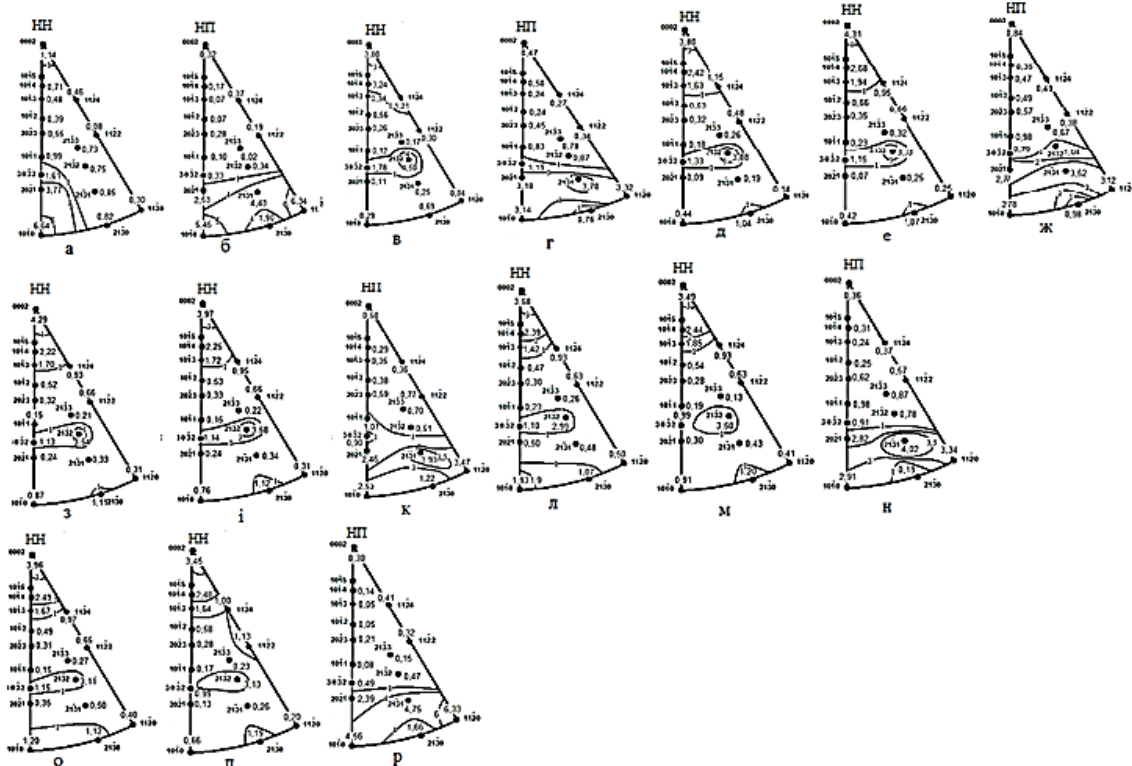


Рис. 2. Експериментальні обернені полюсні фігури сплаву Mg – 5 % (мас.) Li: (а, б) – після обробки № 1; (в, г) – після обробки № 2; після знакозмінного вигину на: 0,5 – (д-ж); 1 – (з-к); 3 – (л-н); 5 – (о-р) циклів; (д, и, м, п) – розтягнутий бік листів; (е, з, л, о) – стиснутий бік листів

**Розв'язок оберненої задачі для сплаву Mg–5 % Li (мас.).** Для теоретичного оцінення модулів пружності сплаву Mg–5 % (мас.) Li потрібні значення пружних сталих сплаву. Для цього складемо систему двох лінійних рівнянь, використовуючи співвідношення типу (1) для експериментальних значень модулів пружності в НВ і ПН, з двома невідомими  $E_c^{розр}$  і  $E_a^{розр}$  для кожного виду обробки сплав магнію Mg–5% (мас.) Li:

$$E_{НВ}^{експ} = f_{НВ} \cdot E_c^{розр} + (1 - f_{НВ}) \cdot E_a^{розр}; \quad (3)$$

$$E_{ПН}^{експ} = f_{ПН} \cdot E_c^{розр} + (1 - f_{ПН}) \cdot E_a^{розр}. \quad (4)$$

Розрахунок показав, що середні величини пружних модулів монокристалів

мають такі значення:  $E_c^{розр} = 53,8$  ГПа;  $E_a^{розр} = 44,6$  ГПа. Розрахункові величини відрізняються від відповідних літературних величин [9] ( $s_{33}^{-1} = E_{0001} = E_c = 56,5$  ГПа;  $s_{11}^{-1} = E_{10\bar{1}0} = E_a = 41,5$  ГПа) на 4,8% і 7,5%, відповідно. Використовуючи розраховані пружні модулі монокристалів сплаву Mg – 5 % (мас.) Li та його параметри текстури Кернса (табл. 3), оцінили пружні модулі відповідних полікристалів після вищезазначених обробок. Експериментальні та розраховані за співвідношенням (1) пружні модулі листів сплаву магнію Mg – 5 % (мас.) Li представлені у таблиці 4.

Таблиця 4

**Розрахункові та експериментальні пружні модулі листів сплаву Mg – 5 % Li**

	Число циклів, n	$E_{НВ}^{розр}$ , ГПа	$E_{ПН}^{експ}$ , ГПа	$E_{НВ}^{розр}$ , ГПа	$E_{ПН}^{експ}$ , ГПа	$\Delta E_{НВ} / E_{НВ}^{експ}$ , %	$E_{ПН}^{розр}$ , ГПа	$E_{ПН}^{експ}$ , ГПа	$\Delta E_{ПН} / E_{ПН}^{експ}$ , %
Після ГЕ	–	45,1	-	43,2	40,6	6,4	51,2	47,4	8,0
Після ПЗ	0	47,4	-	47,4	50,3	5,8	47,9	52,9	9,6
	0.5	47,8	-	44,9	48,2	6,9	46,8	49,6	5,6
	1.0	47,5	-	44,2	46,8	6,3	47,4	51,9	8,7
	3.0	47,6	-	44,3	44,2	0,3	47,6	46,2	3,0
	5.0	47,7	-	43,7	46,2	5,5	48,1	47,6	1,1

Як видно з таблиці 4, розрахунковий модуль  $E$  відрізняється від експериментального не більше ніж на 9,6 %. Виміряти модуль пружності в НН не вдалося через малу товщину листів (1 мм).

Розрахунки за співвідношеннями типу (3) і (4) для межі міцності зразків, вирізаних у НВ і ПН, аналогічні проведеним вище для модуля пружності, показали, що усереднені розрахункові значення межі міцності монокристалів досліджуваного сплаву магнію Mg–5 % (мас.) Li вздовж його осей  $c$  ( $\sigma_{В\ розр}^c$ ) і  $a$  ( $\sigma_{В\ розр}^a$ ) мають такі значення:

$$\sigma_{В\ розр}^c = 181 \text{ МПа}; \quad (7)$$

$$\sigma_{В\ розр}^a = 178 \text{ МПа}. \quad (8)$$

Аналогічні розрахунки за співвідношеннями типу (3) і (4) для межі плинності зразків, вирізаних у НВ та ПН, показали, що величини межі плинності сплаву магнію Mg – 5 % (мас.) Li вздовж осі

$c$  ( $\sigma_{0,2\ розр}^c$ ) і вздовж осі  $a$  ( $\sigma_{0,2\ розр}^a$ ) мають такі значення:

$$\sigma_{0,2\ розр}^c = 122 \text{ МПа}; \quad (9)$$

$$\sigma_{0,2\ розр}^a = 118 \text{ МПа}. \quad (10)$$

У таблицях 5 і 6 показано експериментальні  $\sigma_{В\ експ}^{НВ}$ ,  $\sigma_{В\ експ}^{ПН}$ ,  $\sigma_{0,2\ експ}^{НВ}$ ,  $\sigma_{0,2\ експ}^{ПН}$  і розраховані  $\sigma_{В\ розр}^{НВ}$ ,  $\sigma_{В\ розр}^{ПН}$ ,  $\sigma_{0,2\ розр}^{НВ}$ ,  $\sigma_{0,2\ розр}^{ПН}$  значення межі міцності та межі плинності досліджуваних листів магнієвого сплаву Mg–5 % (мас.) Li. Розрахункові значення отримані після знаходження значень для монокристалів досліджуваного сплаву, обчислених за співвідношеннями типу (3) і (4) для експериментальних значень меж міцності та плинності в НВ і ПН (табл. 5, 6).

Як видно з таблиць 5 і 6, розрахункові величини відхиляються від експериментальних не більше ніж на 8,1 % та 6,1 % для меж міцності та пружності, відповідно.



**Пружні властивості листів Кернса.** Експериментальні ОПФ листів *Ti Grade 1* за параметрами текстури сплаву показані на рисунку 3.

Таблиця 5

Експериментальні та розрахункові величини межі міцності сплаву Mg-5 % Li

	Число циклів, n	$\sigma_{B \text{ експ}}^{HB}$ , ГПа	$\sigma_{B \text{ розр}}^{HB}$ , ГПа	$\Delta\sigma_B^{HB} / \sigma_{B \text{ експ}}^{HB}$ , %	$\sigma_{B \text{ експ}}^{ПН}$ , ГПа	$\sigma_{B \text{ розр}}^{ПН}$ , ГПа	$\Delta\sigma_B^{ПН} / \sigma_{B \text{ експ}}^{ПН}$ , %
Після ГЕ	—	176	178	-1.1	165	178	7.9
Після ПЗ	0	180	179	0.6	184	195	6.0
	0.5	179	179	0	183	168	-8.2
	1.0	178	179	-0.6	182	171	-6.0
	3.0	179	179	0	180	176	-2.2
	5.0	178	178	0	179	178	-0.6

Таблиця 6

Експериментальні та розрахункові величини межі плинності сплаву Mg-5 % Li

	Число циклів, n	$\sigma_{0,2 \text{ експ}}^{HB}$ , ГПа	$\sigma_{0,2 \text{ розр}}^{HB}$ , ГПа	$\Delta\sigma_{0,2}^{HB} / \sigma_{0,2 \text{ експ}}^{HB}$ , %	$\sigma_{0,2 \text{ експ}}^{ПН}$ , ГПа	$\sigma_{0,2 \text{ розр}}^{ПН}$ , ГПа	$\Delta\sigma_{0,2}^{ПН} / \sigma_{0,2 \text{ експ}}^{ПН}$ , %
Після ГЕ	—	176	178	-1.1	165	178	7.9
Після ПЗ	0	180	179	0.6	184	195	6.0
	0.5	179	179	0	183	168	-8.2
	1.0	178	179	-0.6	182	171	-6.0
	3.0	179	179	0	180	176	-2.2
	5.0	178	178	0	179	178	-0.6

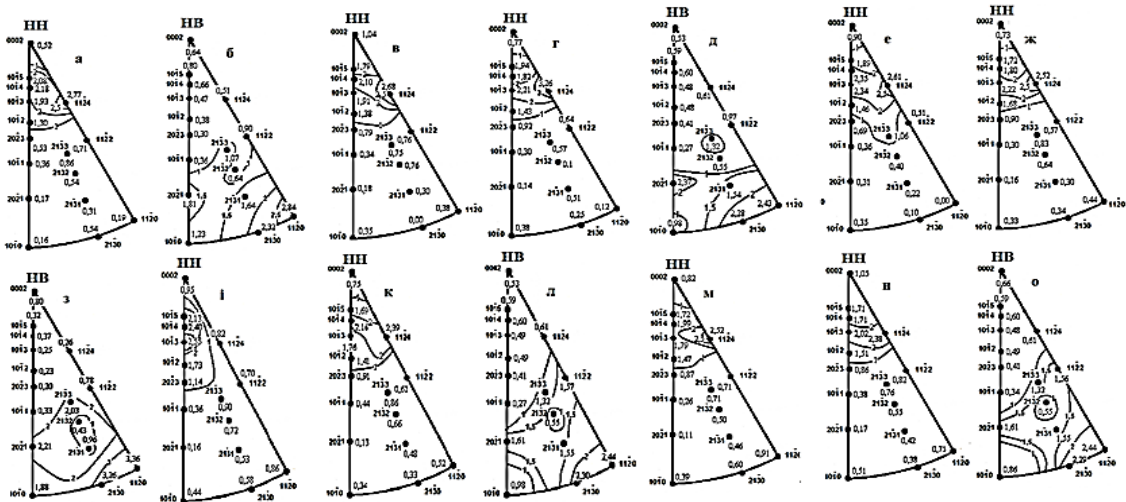


Рис. 3. Експериментальні обернені полюсні фігури титану (*Ti Grade 1*): (а, б) – вихідний лист; листи після знакозмінного вигину на 0,5 (в-д); 1 – (е-з); 3 – (и-л); 5 – (м-о) циклів; (в, е, і, м) – розтягнутий бік листів; (г, ж, к, н) – стиснутий бік листів

Таблиця 7

Параметри текстури Кернса листів *Ti Grade 1*

Число циклов, n	Параметри текстури Кернса				
	$f_{НН}^{(1)}$	$f_{НН}^{(2)}$	$f_{НН}^{(cp)}$	$f_{НВ}$	$f_{ПН}$
0	0,593	0,593	0,593	0,236	0,171
0,5	0,549	0,573	0,561	0,240	0,474
1,0	0,573	0,541	0,557	0,249	0,194
3,0	0,512	0,523	0,518	0,248	0,234
5,0	0,528	0,522	0,525	0,248	0,227

Параметри текстури Кернса, розраховані за ОПФ НН ( $f_{НН}$ ) і ОПФ НВ

( $f_{НВ}$ ) з даних на рисунку 3, і  $f_{ПН}$ , розраховані за співвідношенням (2), наведені в таблиці 7.

Оскільки спостерігаються певні невідповідності на ОПФ НН протилежних боків листів після попереминого згинання, як і раніше при дослідженні магнієвих сплавів, усереднені параметри текстури Кернса ( $f_{НН}^{(cp)}$ ) використано для подальшого аналізу. Значення модулів пружності досліджуваного листа титану, виміряні та



розраховані у напрямках НН, НВ і ПН за співвідношеннями типу (1), наведені в таблиці 8. Для розрахунків використано модулі пружності монокристала титану [10],

з близьким хімічним складом. Відповідно до [10] модуль пружності вздовж гексагональної осі  $c$  ( $E_c = 130$  ГПа) і вздовж осі  $a$  ( $E_a = 99$  ГПа).

Таблиця 8

**Розрахункові та експериментальні значення модуля пружності листів досліджуваного титану Grade 1**

Число циклів, n	$E_{НН}^{розр}$ , ГПа	$E_{НН}^{експ}$ , ГПа	$E_{НВ}^{розр}$ , ГПа	$E_{НВ}^{експ}$ , ГПа	$\Delta E_{НВ} / E_{НВ}^{експ}$ , %	$E_{ПН}^{розр}$ , ГПа	$E_{ПН}^{експ}$ , ГПа	$\Delta E_{ПН} / E_{ПН}^{експ}$ , %
0	117,4	–	106,3	107,6	1,1	104,3	104,8	0,5
0.5	116,0	–	106,4	107,4	0,9	105,1	104,0	-1,1
1.0	116,0	–	106,7	106,4	-0,3	105,0	103,6	-1,7
3.0	115,1	–	106,7	106,0	-0,7	106,3	102,5	-3,7
5.0	115,3	–	106,7	105,4	-1,2	106,1	103,0	-3,0

Максимальне відхилення розрахункового та експериментального значень модуля пружності не перевищує 3,7 %. Виміряти модуль пружності в НН не вдалося через малу товщину листів (1 мм).

**Оцінка меж міцності  $\sigma_B$  та плинності  $\sigma_{0,2}$  листів Ti Grade за даними монокристалів і параметрами текстури Кернса.** У літературі немає даних про межі міцності та плинності монокристала титану вздовж осі  $c$  (відповідно,  $\sigma_B^c$  і  $\sigma_{0,2}^c$ ) і вздовж осі  $a$  ( $\sigma_B^a$  і  $\sigma_{0,2}^a$ ). Використовуючи емпіричні співвідношення [12]:

$$\sigma_B = \frac{H_V}{2,9} \cdot (1-n) \cdot \left[ \frac{12,5 \cdot n}{1-n} \right]^n; \sigma_{0,2} = \frac{H_V}{3},$$

де  $n$  – параметр зміцнення, рівний для

титану 0,11 за даними роботи [11],  $H_V^c = 1770$  МПа і  $H_V^a = 1220$  МПа за даними наноіндентування Ti Grade 1 [12], отримуємо:  $\sigma_B^c = 374$  МПа,  $\sigma_{0,2}^c = 315$  МПа,  $\sigma_B^a = 356$  МПа,  $\sigma_{0,2}^a = 329$  МПа. Далі, подібно до наведених вище розрахунків модулів Юнга з використанням співвідношення типу (1) і параметрів текстури Кернса (табл. 7), ми розрахували значення меж міцності та плинності полікристалічного титанового листа.

Експериментальні та розрахункові значення межі міцності  $\sigma_B$  та межі плинності  $\sigma_{0,2}$  листів Ti Grade 1 наведено в таблицях 9 і 10.

Таблиця 9

**Експериментальні та розрахункові значення межі міцності зразків Ti Grade 1**

Число циклів ПЗ	$\sigma_{В розр}^{НН}$ , МПа	$\sigma_{В експ}^{НН}$ , МПа	$\sigma_{В розр}^{НВ}$ , МПа	$\sigma_{В експ}^{НВ}$ , МПа	$\Delta \sigma_{В}^{НВ} / \sigma_{В експ}^{НВ}$ , %	$\sigma_{В розр}^{ПН}$ , МПа	$\sigma_{В експ}^{ПН}$ , МПа	$\Delta \sigma_{В}^{ПН} / \sigma_{В експ}^{ПН}$ , %
0	380,3	–	386,0	365,0	5,8	387,0	365,0	6,0
0,5	380,8	–	385,9	372,0	3,7	386,6	380,0	1,7
1,0	380,9	–	385,8	365,0	5,7	386,7	382,0	1,2
3,0	381,5	–	385,8	375,0	2,9	386,0	391,0	-1,3
5,0	381,4	–	385,8	370,0	4,3	386,2	385,0	0,3

Таблиця 10

**Експериментальні та розрахункові значення межі плинності зразків Ti Grade 1**

Число циклів ПЗ	$\sigma_{0,2 розр}^{НН}$ , МПа	$\sigma_{0,2 експ}^{НН}$ , МПа	$\sigma_{0,2 розр}^{НВ}$ , МПа	$\sigma_{0,2 експ}^{НВ}$ , МПа	$\Delta \sigma_{0,2}^{НВ} / \sigma_{0,2 експ}^{НВ}$ , %	$\sigma_{0,2 розр}^{ПН}$ , МПа	$\sigma_{0,2 експ}^{ПН}$ , МПа	$\Delta \sigma_{0,2}^{ПН} / \sigma_{0,2 експ}^{ПН}$ , %
0	320,0	–	325,7	300,0	8,6	326,5	305,0	7,1
0,5	321,3	–	325,6	297,0	9,6	326,2	300,0	8,7
1,0	321,3	–	325,5	300,0	8,5	326,2	310,0	5,2
3,0	321,9	–	325,5	310,0	5,0	325,7	336,0	-3,1
5,0	321,8	–	325,5	320,0	1,7	325,8	340,0	-4,2

Як видно з таблиць 9, 10, максимальне відхилення значень міцності та межі плинності, виміряних у НВ і ПН листів досліджуваного титану та розрахованих за параметрами текстури Кернса, не перевищує 10 %. Виміряти зазначені характеристики міцності в НН досліджуваних листів титану не вдалося через їх малу товщину (1 мм).

**Властивості пружності та міцності**

**титану VT1-0 за параметрами текстури Кернса та сталими монокристалів після гвинтової екструзії (ГЕ) та відпалу.**

Обернені полюсні фігури (ОПФ) зразків у напрямку осі екструзії (ОПФ НЕ) і напрямку, перпендикулярному до напрямку осі екструзії (ОПФ ПН) після п'яти проходів ГЕ та після відпалу за вищевказаних температур представлені на рисунку 4.

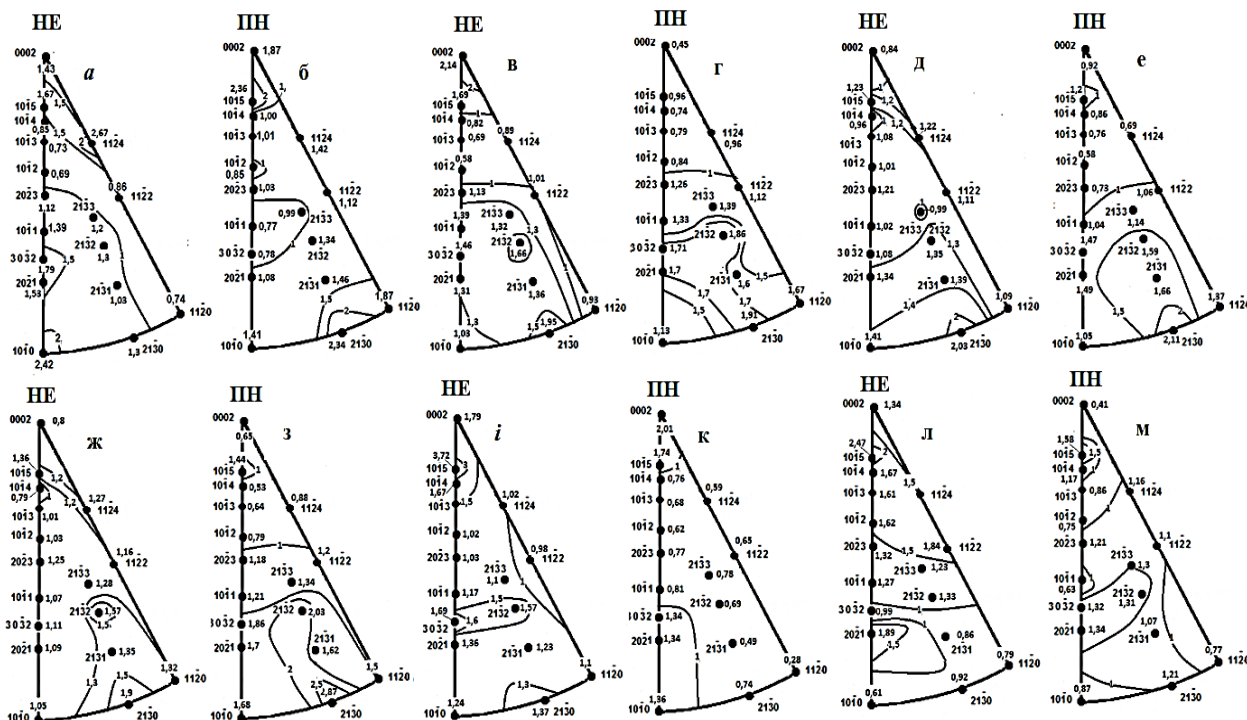


Рис. 4. Обернені полюсні фігури зразків сплаву титану VT1-0 після 5 проходів гвинтової екструзії (а, б) і після відпалу за температур 200 (в, г), 250 (д, е), 300 (з, з), 350 (і, к) і 400 °С (л, м), відповідно

Параметри текстури Кернса, розраховані за ОПФ ОЕ ( $f_{НЕ}$ ) і ОПФ ПН ( $f_{ПН1}$ ) на рисунку 4 та ( $f_{ПН2}$ ), розраховані за співвідношенням (2), наведені в таблиці 11.

Таблиця 11

**Параметри текстури Кернса після 5 проходів гвинтової екструзії та подальшого відпалу сплаву титану VT1-0**

Температура відпалу, °С	$f_{НЕ}$	$f_{ПН1}$	$f_{ПН2}$
після 5 проходів ГЕ	0,488	0,471	0,041
200	0,406	0,363	0,231
250	0,391	0,334	0,275
300	0,407	0,376	0,217
350	0,578	0,325	0,097
400	0,565	0,393	0,042

Для оцінення модуля Юнга досліджуваного титанового сплаву VT1-0

після деформування гвинтовою екструзією та відпалу згідно з (1) скористаємось текстурними коефіцієнтами Кернса (табл. 11) і модулями пружності монокристалів. У працях [13–16] показано результати вимірювань різними авторами модулів пружності монокристалів титану, близького за хімічним складом до досліджуваного сплаву VT1-0. Оскільки експериментальні результати різних авторів відрізняються, для подальших розрахунків візьмемо усереднені значення модулів пружності монокристалів титану.

Для оцінення модулів пружності зразків титану VT1-0 у напрямку осі екструзії (ОЕ) та поперечному напрямку (ПН) використаємо середні значення  $E_c^{cp} \approx 141$  ГПа;

$E_a^{cp} \approx 107$  ГПа із праць [13–16]. Модулі пружності сплаву ВТ1-0 знаходили із співвідношень:

$$E_{HE} = f_{HE} \cdot E_c^{cp} + (1 - f_{HE}) \cdot E_a^{cp}; \quad (11)$$

$$E_{ПН1} = f_{ПН1} \cdot E_c^{cp} + (1 - f_{ПН1}) \cdot E_a^{cp}; \quad (12)$$

$$E_{ПН2} = f_{ПН2} \cdot E_c^{cp} + (1 - f_{ПН2}) \cdot E_a^{cp}. \quad (13)$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 12.

Таблиця 12

**Модулі пружності сплаву титану ВТ1-0, розраховані за текстурними параметрами Кернса (табл. 11) та усередненими пружними модулями монокристала за [13–16]**

Модулі пружності сплаву титану ВТ1-0 після ГЕ та наступного відпалу				
	$E_{HE}$ , ГПа	$E_{ПН1}$ , ГПа	$E_{ПН2}$ , ГПа	$\eta$ , %
після 5 проходів ГЕ	123,6	123,0	108,4	14,0
200	120,8	119,3	114,0	5,96
Після відпалу за $t$ , °C				
250	120,3	118,4	116,4	3,35
300	120,8	119,8	114,4	5,59
350	126,7	118,1	110,3	14,87
400	126,2	120,4	108,4	16,42

де  $\eta = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{min}} \cdot 100\%$  – коефіцієнт анізотропії.

Експериментальний модуль пружності сплаву ВТ1-0 після ГЕ за даними [17] склав  $E_{HE}^{експ} = 113$  ГПа. Розбіжність у 9,4 % може бути пов'язана з тим, що результат у [17] був отриманий шляхом одновісного

розтягування до рівня пластичної деформації  $\varepsilon = 0,7\%$ , з подальшим розвантаженням і повторним навантаженням. У цьому випадку можуть утворюватися мікродфекти, які знижують модуль пружності.

Для оцінювання величин меж міцності та плинності зразків сплаву титану ВТ1-0 після гвинтової екструзії за допомогою параметрів текстури Кернса потрібні відповідні дані монокристала. Тому знайдемо необхідні величини межі міцності та плинності монокристала сплаву ВТ1-0 вздовж осі  $c$  (відповідно  $\sigma_B^c$  і  $\sigma_{0,2}^c$ ) і вздовж осі  $a$  ( $\sigma_B^a$  і  $\sigma_{0,2}^a$ ). Розрахунки проведемо, використовуючи емпіричні співвідношення [14] між твердістю за Віккерсом  $H_V$  та межами міцності та плинності:

$$\sigma_B^c = \frac{H_V}{2,89}; \quad \sigma_{0,2}^c = \frac{H_V}{3,33}. \quad (14)$$

Усереднені за даними [11–14] величини твердості  $H_{Vcp}$  за даними наноіндентації титану ВЕ1-0 вздовж гексагональної осі  $H_{Vcp}^c = 1780$  МПа, а в поперечному напрямку  $H_{Vcp}^a = 1030$  МПа. Використовуючи (14), отримаємо:

$$\sigma_B^c = 615 \text{ МПа}; \quad \sigma_{0,2}^c = 534 \text{ МПа}; \quad (15)$$

$$\sigma_B^a = 356 \text{ МПа}; \quad \sigma_{0,2}^a = 309 \text{ МПа}. \quad (16)$$

Далі, використовуючи співвідношення, аналогічні (11)–(13) і дані (15), (16), ми розрахували властивості міцності та плинності титану ВТ1-0 після гвинтової екструзії та подальшого відпалу. Результати розрахунків наведені в таблиці 13.

Таблиця 13

**Межі міцності та плинності титану ВТ1-0 після гвинтової екструзії та подальшого відпалу, отримані за коефіцієнтами текстури Кернса (табл. 11) та даними для монокристала (15), (16)**

Температура відпалу, °C	$\sigma_B^{HE}$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{HE}$ , МПа	$\sigma_B^{ПН1}$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{ПН1}$ , МПа	$\sigma_B^{ПН2}$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{ПН2}$ , МПа	$\eta_{\sigma_B}$ , %	$\eta_{\sigma_{0,2}}$ , %
–	482	419	478	415	367	319	32,0	32,0
200	461	400	450	391	416	361	11,0	11,0
250	457	397	443	384	427	371	7,0	7,0
300	462	401	454	394	412	358	12,0	12,0
350	506	439	440	382	381	331	33,0	33,0
400	502	436	458	397	367	319	37,0	37,0

Із таблиці 13 видно наявність анізотропії. Максимальні значення  $\sigma_B$  і  $\sigma_{0,2}$  знаходяться в напрямку осі екструзії (HE). Коефіцієнти анізотропії ( $\eta$ ) межі міцності та межі плинності мінімальні після відпалу за 250 °С. Подальше збільшення анізотропії з підвищенням температури відпалу пов'язане з рекристалізацією.

Експериментальні дані після 5 проходів GE [17] були такими:  $\sigma_B^{HE} = 475$  МПа, а  $\sigma_{0,2}^{HE} = 412$  МПа. Отримані нами відповідні розрахункові значення досліджуваних зразків (табл. 13) перевищують наведені в [17] приблизно на 1,5 і 1,7 % відповідно.

### Висновки

1. Використання параметрів текстури Кернса та характеристик монокристалів магнієвих сплавів ZE10, Mg 5 % Li (мас. %), титану Grade1 і VT1-0 дозволило

розрахувати відповідні властивості полікристалів та їх анізотропію з відхиленням від експериментальних даних у межах 5–10 % після різних видів деформації: вальцювання, попереминого згинання і гвинтової екструзії.

2. Використання параметрів текстури Кернса, експериментальних значень модуля пружності, меж міцності та плинності полікристалічних листів досліджуваних магнієвих і титанових сплавів дозволило оцінити характеристики монокристалів із відхиленням від експериментальних не більше 10 %.

3. Між значеннями модуля пружності, механічними характеристиками досліджуваних листів магнієвих і титанових сплавів, з одного боку, та відповідними параметрами текстури Кернса, з іншого боку, існують сильні кореляційні зв'язки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Methods of leveling sheet metal. URL: <https://www.arku.com/en/magazine/sheet-metalleveling-methods-en/>
2. Segal V. Review : Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). *Materials*. 2018. № 11 (7). P. 1175. URL: <https://doi.org/10.3390/ma11071175>
3. Magnesium-based alloy for wrought applications. URL: <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Magnesium-based-alloy-wrought-applications/WO2011146970A1.html>
4. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impuls Excitation of Vibration. URL: [http://forlab.pt/wpcontent/uploads/2015/08/E1876\\_mvuj8965.pdf](http://forlab.pt/wpcontent/uploads/2015/08/E1876_mvuj8965.pdf)
5. X-ray diffraction (XRD). URL: <https://ywcmatsci.yale.edu/xrd>
6. Morris P. R. Reducing the Effects of Nonuniform Pole Distribution in Inverse Pole Figure Studies. *Journal of Applied Physics*. 1959. № 30 (4). Pp. 595–599. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1702413>
7. Kearns J. J. Thermal expansion and preferred orientation in zircaloy. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/WAPDTM472.xhtml>
8. San'kova S. V., Shkatulyak N. M., Usov V. V., Volchok N. A. The Elastic Constants of the Single Crystal of the Mg–Zn–Zr–REM Alloy from the Data of the Elastic Anisotropy and the Texture of the Polycrystalline Sheet. *International Journal of Metals*. 2014. Article ID 142920. 6 p. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijmet/2014/142920/>
9. Shkatulyak N. M., Usov V. V., Smirnova S. V. Single crystal magnesium lithium alloy elastic constants. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE)*. 2015. № 4 (4). Pp. 1–11. URL: <https://issuu.com/ijamsejournal/docs/4415ijamse01/1>
10. Gong J. & Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal  $\alpha$ -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010. № 90 (7). Pp. 503–512. URL: <https://doi.org/10.1080/09500831003772989>
11. Zambaldi C., Yang Y., Bieler T.R. et al. Orientation informed nanoindentation of  $\alpha$ -titanium : Indentation pileup in hexagonal metals deforming by prismatic slip. *Journal of Materials Research*. 2012. № 27. Pp. 356–367. URL: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.334>
12. Lubenets S. V., Rusakova A. V., Fomenko L. S., Moskalenko V. A. Micromechanical properties of single crystals and polycrystals of pure  $\alpha$ -titanium: Anisotropy of microhardness, size effect, effect of the temperature (77-300 K). *Low Temp. Phys.* 2018. № 44 (1). Pp. 96–105. URL: [https://www.researchgate.net/publication/322199541\\_Micromechanical\\_properties\\_of\\_single\\_crystals\\_and\\_polycrystals\\_of\\_pure\\_titanium\\_Anisotropy\\_of\\_microhardness\\_size\\_effect\\_effect\\_of\\_the\\_temperature\\_77-300\\_K](https://www.researchgate.net/publication/322199541_Micromechanical_properties_of_single_crystals_and_polycrystals_of_pure_titanium_Anisotropy_of_microhardness_size_effect_effect_of_the_temperature_77-300_K)
13. Weaver J. S. et. al. On capturing the grain-scale elastic and plastic anisotropy of  $\alpha$ -Ti with spherical nanoindentation and electron back-scattered diffraction. *Acta Materialia*. 2016. № 117. Pp. 23–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.053>
14. Zhang P., Li S. X., Zhang Z. F. General relationship between strength and hardness. *Materials Science and*

*Engineering A.* 2011. № 529. Pp. 62–73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.061>

15. Gong J., Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal  $\alpha$ -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010. № 90 (7). Pp. 503–512. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/09500831003772989>

16. Zhang J.-M., Zhang Y., Xu K.-W., Ji V. Anisotropic elasticity in hexagonal crystals. *Thin Solid Films*. 2007. № 515 (17). Pp. 7020–7024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.01.045>

17. Karpinos B. S., Pavlenko D. V., Kachan O. Ya. Deformation of a submicrocrystalline VT1-0 titanium alloy under static loading. *Strength of Materials*. 2012. № 44 (1). Pp. 100–107. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-012-9354-9>

## REFERENCES

1. Methods of leveling sheet metal. URL: <https://www.arku.com/en/magazine/sheet-metalleveling-methods-en/>

2. Segal V. Review : Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). *Materials*. 2018, no. 11 (7), pp. 1175. URL: <https://doi.org/10.3390/ma11071175>

3. Magnesium-based alloy for wrought applications. URL: <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Magnesium-based-alloy-wrought-applications/WO2011146970A1.html>

4. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impuls Excitation of Vibration. URL: [http://forlab.pt/wpcontent/uploads/2015/08/E1876\\_mvuj8965.pdf](http://forlab.pt/wpcontent/uploads/2015/08/E1876_mvuj8965.pdf)

5. X-ray diffraction (XRD). URL: <https://ywcmatsci.yale.edu/xrd>

6. Morris P.R. Reducing the Effects of Nonuniform Pole Distribution in Inverse Pole Figure Studies. *Journal of Applied Physics*. 1959, no. 30 (4), pp. 595–599. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1702413>

7. Kearns J.J. Thermal expansion and preferred orientation in zircaloy. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/WAPDTM472.xhtml>

8. San'kova S.V., Shkatulyak N.M., Usov V.V. and Volchok N.A. The Elastic Constants of the Single Crystal of the Mg–Zn–Zr–REM Alloy from the Data of the Elastic Anisotropy and the Texture of the Polycrystalline Sheet. *International Journal of Metals*. 2014, article ID 142920, 6 pages. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijmet/2014/142920/>

9. Shkatulyak N.M., Usov V.V. and Smirnova S.V. Single crystal magnesium lithium alloy elastic constants. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE)*. 2015, no. 4 (4), pp. 1–11. URL: <https://issuu.com/ijamsejournal/docs/4415ijamse01/1>

10. Gong J. and Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal  $\alpha$ -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010, no. 90 (7), pp. 503–512. URL: <https://doi.org/10.1080/09500831003772989>

11. Zambaldi C., Yang Y., Bieler T.R. et al. Orientation informed nanoindentation of  $\alpha$ -titanium : Indentation pileup in hexagonal metals deforming by prismatic slip. *Journal of Materials Research*. 2012, no. 27, pp. 356–367. URL: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.334>

12. Lubenets S.V., Rusakova A.V., Fomenko L.S. and Moskalenko V.A. Micromechanical properties of single crystals and polycrystals of pure  $\alpha$ -titanium : Anisotropy of microhardness, size effect, effect of the temperature (77-300 K). *Low Temp. Phys.* 2018, no. 44 (1), pp. 96–105. URL: [https://www.researchgate.net/publication/322199541\\_Micromechanical\\_properties\\_of\\_single\\_crystals\\_and\\_polycrystals\\_of\\_pure\\_titanium\\_Anisotropy\\_of\\_microhardness\\_size\\_effect\\_effect\\_of\\_the\\_temperature\\_77-300\\_K](https://www.researchgate.net/publication/322199541_Micromechanical_properties_of_single_crystals_and_polycrystals_of_pure_titanium_Anisotropy_of_microhardness_size_effect_effect_of_the_temperature_77-300_K)

13. Weaver J.S. et. al. On capturing the grain-scale elastic and plastic anisotropy of alpha-Ti with spherical nanoindentation and electron back-scattered diffraction. *Acta Materialia*. 2016, no. 117, pp. 23–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.053>

14. Zhang P., Li S. X. and Zhang Z.F. General relationship between strength and hardness. *Materials Science and Engineering A*. 2011, no. 529, pp. 62–73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.061>

15. Gong J. and Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal  $\alpha$ -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010, no. 90 (7), pp. 503–512. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/09500831003772989>

16. Zhang J.-M., Zhang Y., Xu K.-W. and Ji V. Anisotropic elasticity in hexagonal crystals. *Thin Solid Films*. 2007, no. 515 (17), pp. 7020–7024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.01.045>

17. Karpinos B.S., Pavlenko D.V. and Kachan O.Ya. Deformation of a submicrocrystalline VT1-0 titanium alloy under static loading. *Strength of Materials*. 2012, no. 44 (1), pp. 100–107. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-012-9354-9>

Надійшла до редакції: 16.04.2024.