

В. Усов, Н. Шкатуляк, Т. Совкова, Н. Рибак

## **Характеристики монокристалу сплаву Mg - 5% Li, знайдені за експериментальними даними полікристалу й параметрами текстури Кернса**

*Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, вул. Старопортофранківська, 26, 65020 Одеса, Україна, [valentinusov67@gmail.com](mailto:valentinusov67@gmail.com)*

Метою даної роботи є експериментальне визначення параметрів текстури Кернса, модулів пружності, механічних властивостей (межі міцності та плинності) листів сплаву Mg 5 мас. % Li після різних видів обробки: 1) екструзії при 350°C через прямокутну матрицю, 2) вальцювання зі зміною його напрямку на 90° та проміжного відпалу при 350°C після кожного проходу, 3) після подальшого знакозмінного вигину (ЗВ) на 0,5; 1; 3 і 5 циклів, та оцінка за зазначеними даними пружних та механічних властивостей відповідного монокристалу досліджуваного сплаву. Модулі пружності та характеристики міцності досліджуваних полікристалічних зразків визначали у напрямку вальцювання (НВ) та поперечному напрямку (ПН). За допомогою визначених параметрів текстури Кернса та пружних і механічних властивостей листів оцінили значення модулів пружності й межі міцності та плинності монокристалу вищезазначеного сплаву. Модулі пружності та характеристики міцності досліджуваних зразків сплаву магнію Mg 5 мас. % Li, розрахованих за знайденими відповідними характеристиками монокристалу, відхиляються від експериментальних не більше ніж на 10 %.

**Ключові слова:** сплав Mg 5 мас. % Li, екструзія, вальцювання, знакозмінний вигин, параметри текстури Кернса, модуль пружності, межа міцності, умовна межа плинності, монокристал.

*Подано до редакції 25.01.2022; прийнято до друку 21.09.2022.*

### **Вступ**

Магній-літєві сплави є цікавими як біорозкладні матеріали. Завдяки низькому модулю Юнга та підвищеній корозійній стійкості ці сплави виявилися перспективними для ендопротезів (стентів) кровоносних судин, біорозкладних або саморозсмоктуваних стентів. Важливою перевагою таких стентів є те, що завдяки хорошій біологічній сумісності в живому організмі структурний матеріал стента повільно розчиняється. Згодом цей пристрій поступово зникає після того, як виконує свою медичну функцію підтримки стінки судини. Таким чином, зникнення стента запобігає виникненню тромбозу [1]. Наприклад, відомі біорозкладні сплави Mg-3,5Li, Mg-8,5Li, Mg-14Li (мас.%) [2]. Збільшення літію у бінарних магнієвих сприяє росту їх пластичності, але

у той же час як міцність все ще може бути достатньою для багатьох біомедичних застосувань [2].

Сплави на основі Mg-Li є перспективними для застосування в аерокосмічних, авіаційних та транспортних конструкціях, а також у надважких системах зв'язку завдяки своїй невеликій густині та значній міцності у перерахунку на одиницю маси [3]. Але практичне використання зазначених сплавів обмежується, зокрема, недостатністю інформації про анізотропію їх фізико-механічних характеристик. Анізотропія властивостей в значній мірі обумовлена кристалографічною текстурою, яка виникає при різних видах термічної обробки та деформації магнієвих сплавів [4]. Вплив текстури на анізотропію пружних та механічних властивостей магній-літєвих сплавів досі є недостатньо вивченим.

Відомо, що більшість сучасних технологій

обробки листового металу передбачають механічні або термічні впливи, які є причиною внутрішніх напружень у матеріалі. Ступінь їх виразності залежить від хімічного складу, початкового напруженого стану сплаву тощо. У результаті виникає ряд труднощів при подальшій обробці деталей, отриманні заданої геометрії, що може призвести до браку продукції. Перед використанням рулони або листи металу часто піддають випрямленню (правці), яка полягає в знакозмінному вигині (ЗВ) на роликівих вирівнювачах для забезпечення хороших показників площинності [5].

З практичної точки зору така обробка дозволяє знизити внутрішні напруження металу. Але навіть невелика пластична деформація при знакозмінному вигині приводить до помітних структурних перетворень металевого прокату та його механічних характеристик, вивчення яких практично важливим.

З наукового погляду, при знакозмінному вигині стає можливим вивчення процесів зміни мікроструктури і текстури при розтягу та стиску одного та того ж зразка, на якому під час згинання одна сторона металу розтягується, а інша сторона стискається. Дані про властивості металу, в тому числі модуль пружності, дозволяє проектувати вироби з передбачуваними та оптимальними властивостями на втому або руйнування.

Експериментальне визначення певних характеристик полікристалічного зразка (пружність, або міцність) іноді буває достатньо складним, порою неможливим. Наприклад, після гвинтової екструзії в напрямку, перпендикулярному осі екструзії, внаслідок обмеженої товщини зразка виникають відомі труднощі при вимірі механічних та пружних властивостей.

Опис текстури полікристалічного зразка з гексагональною структурою за допомогою параметрів Кернса [6-8] в принципі дозволяє визначити фізико-механічні властивості металу, якщо відомі відповідні характеристики його монокристалу [9, 10].

У запропонованій роботі автори спробували вирішити до певної міри зворотню задачу, а саме, оцінити певні характеристики монокристалу Mg-5% Li (мас.) за характеристиками текстури та експериментальними значеннями відповідних властивостей полікристалічних зразків зазначеного сплаву магнію.

Метою даній роботи є визначення текстурних параметрів Кернса та пружних та механічних властивостей (меж міцності та плинності) полікристалічного бінарного магній-літійового сплаву Mg-5% Li (мас.) після обробки за допомогою екструзії, вальцювання зі зміною напрямку на 90°, а також після подальшого знакозмінного вигину на 0,5; 1; 3 і 5 циклів, та оцінка пружних та механічних властивостей відповідного монокристалу досліджуваного сплаву за вищезазначеними даними.

## I. Матеріал і методи дослідження

Вихідні циліндричні заготовки сплаву Mg-5% Li (мас.) довжиною 120 мм спочатку деформували

методом екструзії через прямокутну матрицю при температурі 350°C. Отримані в результаті пластини товщиною 6 мм, шириною 60 мм і довжиною 120 мм вальцювали далі в одному напрямку. Вальцювання провели у 2 проходи з проміжним нагрівом до 350°C і отримали листи товщиною 4 мм (обробка № 1)

Отримані таким способом листи вальцювали далі в напрямку, розташованому перпендикулярно попередньому, з обтісненнями 10 % за прохід. При цьому здійснили 10 проходів з проміжним нагрівом до 350°C після кожного й отримали листи товщиною 2 мм. Далі знову змінили напрямок вальцювання на 90° і здійснили 1 прохід зі ступенем деформації за товщиною 10 %. Після повторної зміни напрямку на поперечний вальцювали листи до товщини 1 мм (обробка № 2).

Знакозмінний вигин таких листів товщиною 1 мм (обробка №3) здійснювали за допомогою спеціального пристрою, що складається з трьох роликів і приводиться у дію вручну. Ролик, що вигинає, має діаметр 50 мм. При вигині метал рухався зі швидкістю ~150 мм/с. Вигин в одному напрямку відповідає 0.25 циклу. Повернення до початкового плоского стану відповідає 0.5 циклу. Потім здійснювали вигин в протилежний бік (0.75 циклу) та повернення до плоского стану (1.0 цикл). Досліджували зразки, вирізані у напрямку вальцювання (НВ) та поперечному напрямку (ПН), після 0,5; 1,0; 3,0 та 5,0 циклів знакозмінного вигину (ЗВ).

Динамічним резонансним методом визначали модуль пружності на прямокутних зразках розміром (100 × 10) мм, вирізаних у напрямку вальцювання (НВ) та поперечному напрямку (ПН) з листа до початку здійснення вигину (вихідний лист) та листів після 0,5; 1,0; 3,0 та 5,0 циклів знакозмінного вигину. Похибка не перевищувала 1% [11].

Механічні випробування проводили на розривній машині 250N5A WN: 143331 з силовим датчиком ID: 0 WN: 805506 20 kN при кімнатній температурі для зразків, вирізаних у НП і ПН. Довжина і ширина робочої частини зразків складала 15 мм і 12,5 мм, відповідно. Як значення механічних властивостей брали усереднену величину за трьома партіями зразків в кожному напрямку.

Для дослідження текстури проводили  $\Theta$ -2 $\Theta$  сканування зразків за геометрією Брега-Брентано на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3М у фільтрованому випромінюванні  $K_{\alpha}$ -Mo. Зйомку профілів дифракційних ліній здійснювали від площини вальцювання (з двох протилежних сторін) та площини перпендикулярної напрямку вальцювання досліджуваних зразків, а також зразка без текстури (еталона). Еталон виготовили з відпаленої тирси досліджуваного сплаву магнію. Зразки попередньо протравлювали для зняття спотвореного деформацією поверхневого шару 0.1 мм. За результатами зйомки будували обернені

полосні фігури (ОПФ) напрямку нормалі (НН) до площині вальцювання (ОПФ НН) для двох протилежних сторін листа, та напрямку вальцювання (ОПФ НВ). Для зйомки ОПФ НВ виготовляли набірні зразки.

## II. Експериментальні результати й обговорення

Обернені полюсні фігури досліджуваного сплаву представлені на рис. 1.

Текстура листів досліджуваного сплаву після обробки № 1 характеризується наявністю відносно слабого базисного компонента (полюсна щільність 1,14 на рис. 1, а) та дуже сильним компонентом (1010) (полюсна щільність 6,64 на рис. 1, а). При цьому на ОПФ НП (рис. 1, б) спостерігається два сильних максимуму полюсної щільності поблизу полюса  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  величиною 5.45 та  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  величиною 6.34. Текстура може бути описана комбінацією слабого базисного центрального типу та відхиленого на  $90^\circ$  у ПН базисного типу. При цьому з НВ такого листа збігаються, в основному (з розсіюванням), кристалографічні напрямки  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  та  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ .

На рис. 1 (с, d) представлено ОПФ ПН та ОПФ НП досліджуваного сплаву після обробки № 2. Видно, що гексагональна вісь призми відхилена від НН до площини прокатки приблизно на  $0-15^\circ$  і  $70^\circ$  у бік ПН (рис. 1, с, е, f, h, i). Текстура складається з комбінації базисного компоненту з розсіянням до  $15^\circ$  у бік ПН та відносно сильного компонента  $\langle 21\bar{3}2 \rangle$ . У чистому магнію при тих самих умовах формується текстура базисного центрального типу.

Легування магнію літієм сприяє зміні співвідношення механізмів деформації, що впливає на текстуру. Легування магнію літієм сприяє зменшенню відношення осей  $c/a$  і цим активує небазисні механізми ковзання. Зокрема, при підвищених температурах роль призматичного ковзання дислокацій в Mg-Li сплавах може бути значною [12]. Формуванню компонентів текстури відхиленого в ПН базисного типу, ймовірно, сприяє активізація призматичного ковзання, а також дублювання (рис. 1).

Як видно з ОПФ НП (рис. 1, d, g, j, m, p), з НП переважно збігається кристалографічний напрямок  $\langle 21\bar{3}1 \rangle$ . У той же час слід зазначити, що область підвищеної полюсної щільності на ОПФ НП займає досить широку область між полюсами  $\langle 30\bar{3}2 \rangle$ ,  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  та  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ . Тип і характер розсіювання текстури після знакозмінного вигину залежить від числа циклів знакозмінного вигину, як згадувалося вище. Більш докладний опис текстури та мікроструктури після ЗВ можна знайти у роботі [12].

Коефіцієнти текстури Кернса зручно використовувати для більш об'єктивної кількісної оцінки текстури гексагональних матеріалів [6-8]. Такі коефіцієнти,  $f_j$  (індекс  $j$  означає певний напрямок в зразку - НН, НВ або ПН), характеризують наскільки збігаються  $c$ -осі гексагональних зерен із визначеним геометричним напрямком в полікристалі. Коефіцієнти  $f_j$  знаходяться з ОПФ за таким співвідношенням

$$f_j = \langle \cos^2 \alpha_i \rangle_j = \sum_i A_i P_{ji} \cos^2 \alpha_i, \quad (1)$$

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

інтенсивності  $i$ -того рефлексу на  $j$ -тій ОПФ до відповідного значенням інтенсивності рефлексу зразка без текстури  $I_R$ ;  $I_R$  - статистичні ваги  $i$ -того рефлексу ( $\sum A_i P_{ji} = 1$ ) [6].

Множники  $A_i$  показують, яка частка площі поверхні стереографічного трикутника навколо нормалі належить  $i$ -тому рефлексу відповідної ОПФ [14];  $\alpha_i$  означає, на якій кут відхиляється від гексагональної осі  $c$   $i$ -тий кристалографічний напрямок для  $j$ -того напрямку в зразку.

Кількісне значення деякої властивості  $P(\varphi)$ , що зв'язують дві векторні величини або тензор зі скалярною величиною у гексагональному монокристалі може бути виражене [6-8] як:

$$P(\varphi)_{ref} = P_c \cos^2 \varphi + P_a (1 - \cos^2 \varphi) \quad (2)$$

де  $P(\varphi)_{ref}$  - властивість в обраному напрямку,  $P_a$  і  $P_c$  - властивість монокристалла в напрямку, перпендикулярному і паралельному до напрямку  $[0002]$ , відповідно,  $\varphi$  - кут між обраним напрямком і  $[0002]$ .

Об'ємний внесок у властивість кристалів, осі яких нахилені над кут  $\varphi$  до визначеного напрямку, якщо врахувати, що внесок зерен полікристалу у об'ємну властивість відповідно до їх об'ємної частці,  $V_i$ , можна знайти таким чином:

$$P(\varphi_i)_{ref} = P_c V_i \cos^2 \varphi_i + P_a V_i (1 - \cos^2 \varphi_i). \quad (3)$$

Якщо підсумувати за всім об'ємом, то можна записати, що:

$$P(\varphi_i)_{ref} = P_c \sum_i V_i \cos^2 \varphi_i + P_a \sum_i V_i (1 - \cos^2 \varphi_i). \quad (4)$$

Оскільки  $\sum_i V_i = 1$ , при цьому  $\sum_i V_i \cos^2 \varphi_i = f_j$  - текстурний параметр Кернса, то отримуємо:

$$P(\varphi_i)_{ref} = f_j P_c + (1 - f_j) P_a. \quad (5)$$

Для знаходження текстурних параметрів Кернса ми використовували ОПФ на рис. 1, значення  $A_i$ , які були взяті з [16]. Для розрахунку значення кутів за відомими формулами [17] використовували відношення параметрів  $c/a = 1,61$  кристалічної решітки досліджуваного сплаву Mg-5% (мас.) Li, яке ми визначили експериментально.

Тензорні властивості (наприклад, механічні напруження, або модулі пружності) можуть бути знайдені за співвідношенням (5), як показав Кернс [8]. При цьому, сума параметрів  $f_j$  в трьох головних напрямках листового матеріалу з гексагональною граткою має бути рівною одиниці. Якщо ж значенні параметрів  $f_j$  дорівнює 1/3 в кожному з головних напрямків листа, то маємо ізоτροпію відповідної властивості. Виходячи з відси, знаючи два з трьох параметрів Кернса (наприклад, якщо ми визначили  $f_{НН}$  та  $f_{НВ}$ ), то третій параметр  $f_{ПН}$  може бути знайдений з рівняння:

$$f_{НН} + f_{НВ} + f_{ПН} = 1. \quad (6)$$



З іншого боку, якщо відомі параметри текстури Кернса  $f_j$  та певні властивості  $P(\varphi_i)_{ref}$  в двох напрямках полікристалічного зразка, то можливо оцінити відповідні характеристики монокристала  $P_c$  і  $P_a$  за співвідношеннями типу (5).

Параметри текстури Кернса, розраховані з НН ОПФ ( $f_{НН}$ ) і НВ ОПФ ( $f_{НВ}$ ) з даних на рис. 1, а також  $f_{ПН}$ , розраховані за співвідношенням (6), наведені в табл. 1. Спостерігаються невідповідності в розподілі полюсної щільності на полюсних фігурах ND протилежних сторін листів досліджуваного сплаву після відповідної кількості циклів попереминого вигину, як видно на рис. 2 (д – м). Це пов'язано з тим, що на опуклому боці поверхневі шари зразка зазнають деформації розтягу (рис. 2, f, h, k, m), тоді як шари на протилежній стороні листа зазнають деформації стиснення (рис. 2, d, g, i, l). Під час випрямлення, навпаки, шари металу на опуклій стороні листа зазнають деформації стиснення, тоді як шари металу на увігнутій стороні листа зазнають деформацію розтягу.

Аналогічні невідповідності спостерігали також автори роботи [18], які вивчали текстуру смуг сплаву Zr-2,5% Nb. Для отримання смуги від труби зі сплаву Zr-2,5% Nb відрізали певну частину, а потім її розрізали вздовж її довжини та випрямили до плоского стану. Подібні невідповідності ми також спостерігали при вивченні знакозмінного вигину титану [19].

Вищезазначені невідповідності в розподілі полюсної щільності на ОПФ НН протилежних сторін листів досліджуваного сплаву Mg-5 % (wt.) Li після

різної кількості циклів ЗВ, спостерігаються у величинах відповідних текстурних коефіцієнтів Кернса (табл. 1).

Для урахування зазначених невідповідностей ми визначили усереднені по обидва боки листів текстурні параметри Кернса  $f_{НН}^{(av)}$  для подальшого аналізу властивостей листів після відповідного числа циклів ЗВ.

Значення модуля пружності листів досліджуваного сплаву магнію, виміряні і розраховані в НН, НП і ПН за співвідношеннями типу (5), приведено в табл. 2. При розрахунках використовували значення констант пружності монокристалу сплаву Mg 5 % (мас.) Li  $S_{33} = 1.77 * 10^{-11} Pa^{-11}$  та  $S_{11} = 2.41 * 10^{-11} Pa^{-11}$  визначених нами раніше [20]. Так як  $\frac{1}{S_{33}} = E_{0001} = E_c$ , та  $\frac{1}{S_{11}} = E_{10\bar{1}0} = E_a$ , то маємо значення модуля пружності монокристала досліджуваного сплаву уздовж гексагональної осі  $c$  та уздовж осі  $a$ , відповідно

$$E_c = 56.5 \text{ ГПа}, \tag{7}$$

$$E_a = 41.5 \text{ ГПа}. \tag{8}$$

З табл. 2 видно, що розрахункові значення модуля пружності листів досліджуваного сплаву магнію, отримані з використанням відповідних вищезазначених даних його монокристалу, відрізняються від експериментальних величин не більше ніж на 10 %.

**Таблиця 1**

Параметри текстури Кернса сплаву Mg-5 % (мас.) Li.

	Число циклів, n	Параметри текстури Кернса				
		$f_{ND}^{(1)}$	$f_{ND}^{(2)}$	$f_{ND}^{(av)}$	$f_{RD}$	$f_{TD}$
Після екструзії	-	0.239	0.239	0.239	0.114	0,647
Після знакозмінного вигину	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

**Таблиця 2**

Розрахункові і експериментальні значення модуля пружності листів досліджуваного сплаву Mg – 5 % (мас.) Li .

	Число циклів, n	$E_{НН}^{розрах.}$ , ГПа	$E_{НН}^{експ.}$ , ГПа	$E_{НВ}^{розрах.}$ , ГПа	$E_{НВ}^{експ.}$ , ГПа	$\frac{\Delta E}{E}$ , %	$E_{ПН}^{розрах.}$ , ГПа	$E_{ПН}^{експ.}$ , ГПа	$\frac{\Delta E}{E}$ , %
Після екструзії	-	45.1	-	43.2	40.6	6.4	51.2	47.4	8.0
Після знакозмінного вигину	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

Характеристики монокристала сплаву Mg - 5% Li, знайдені за експериментальними даними полікристала...

Тепер спробуємо вирішити зворотну задачу та розрахуємо модуль пружності монокристалу сплаву Mg - 5 % (mas) Li за даними модуля пружності листів сплаву, визначеними експериментально в напрямку вальцювання та поперечному напрямку (табл. 2). Для цього складемо систему двох лінійних рівнянь, користуючись співвідношеннями типу (5) для експериментальних значень модулів пружності в НВ та ПН, з двома невідомими  $E_c^{розрах}$  та  $E_a^{розрах}$  для кожного виду обробки листів досліджуваного сплаву магнію. Розрахунки показали, що усереднені значення модулів пружності монокристала ( $E_c^{calc}$ ,  $E_a^{calc}$ ) мають такі значення:

$$E_c^{розрах} = 53.8 \text{ ГПа}, \quad (9)$$

$$E_a^{розрах} = 44.6 \text{ ГПа}. \quad (10)$$

Розрахункові величини (9) і (10) відрізняються від відповідних значень (7) і (8) на 4.8 % і 7.5 %, відповідно.

Розрахунки за співвідношеннями типу (5) для меж міцності зразків, вирізаних у НВ та ПН, аналогічні проведеним вище для модуля пружності, показали, що усереднені значення меж міцності монокристала дослідженого сплаву магнію вздовж його осей  $c$  ( $\sigma_{В розрах}^c$ ) та  $a$  ( $\sigma_{В розрах}^a$ ) мають такі значення:

$$\sigma_{В розрах}^c = 181 \text{ МПа}, \quad (11)$$

$$\sigma_{В розрах}^a = 178 \text{ МПа}. \quad (12)$$

Аналогічні розрахунки за співвідношеннями типу (5) для меж плинності зразків, вирізаних у НВ та ПН, показали, що усереднені значення меж плинності монокристала дослідженого сплаву магнію вздовж його осей  $c$  ( $\sigma_{0.2 розрах}^c$ ) та  $a$  ( $\sigma_{0.2 розрах}^a$ ) мають такі значення:

$$\sigma_{0.2 розрах}^c = 122 \text{ МПа}, \quad (13)$$

$$\sigma_{0.2 розрах}^a = 118 \text{ МПа}. \quad (14)$$

В табл. 3, 4 представлені експериментальні  $\sigma_{В експ.}^{НВ}$ ,  $\sigma_{В експ.}^{ПН}$ ,  $\sigma_{0.2 експ.}^{НВ}$ ,  $\sigma_{0.2 експ.}^{ПН}$  та розрахункові  $\sigma_{В розрах.}^{НВ}$ ,  $\sigma_{В розрах.}^{ПН}$ ,  $\sigma_{0.2 розрах.}^{НВ}$ ,  $\sigma_{0.2 розрах.}^{ПН}$  значення меж міцності та плинності листів досліджуваного сплаву магнію. Розрахункові величини були отримані після того, як були розраховані відповідні величини для монокристалу досліджуваного сплаву, користуючись співвідношеннями типу (5) для експериментальних значень меж міцності та плинності у НВ та ПН (табл. 3, 4).

З табл. 3 та 4 видно, що значення меж міцності та плинності зразків досліджуваного сплаву, отримані за розрахунками з використанням відповідних величин для монокристалу сплаву (11) – (14), відрізняються від експериментальних значень не більше ніж на 8.2 %, а відповідні значення меж плинності – не більше ніж на 6.1 %.

Таблиця 3

Експериментальні та розрахункові значення меж міцності листів досліджуваного сплаву Mg - 5 % (мас.) Li.

	Число циклів, n	$\sigma_{В експ.}^{НВ}$ , ГПа	$\sigma_{В розрах.}^{НВ}$ , ГПа	$\frac{\Delta\sigma_{В}^{НВ}}{\sigma_{В експ.}^{НВ}}$ , %	$\sigma_{В експ.}^{ПН}$ , ГПа	$\sigma_{В розрах.}^{ПН}$ , ГПа	$\frac{\Delta\sigma_{В}^{ПН}}{\sigma_{В експ.}^{ПН}}$ , %
Після екструзії	-	176	178	-1.1	165	178	7.9
Після знако-змінного вигину	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 4

Експериментальні та розрахункові значення умовної межі плинності листів досліджуваного сплаву Mg - 5 % (мас.) Li.

	Число циклів, n	$\sigma_{0.2 експ.}^{НВ}$ , ГПа	$\sigma_{0.2 розрах.}^{НВ}$ , ГПа	$\frac{\Delta\sigma_{0.2}^{НВ}}{\sigma_{0.2 експ.}^{НВ}}$ , %	$\sigma_{0.2 експ.}^{ПН}$ , ГПа	$\sigma_{0.2 розрах.}^{ПН}$ , ГПа	$\frac{\Delta\sigma_{0.2}^{ПН}}{\sigma_{0.2 експ.}^{ПН}}$ , %
Після екструзії	-	117	119	1.7	114	121	6.1
Після знако-змінного вигину	0	120	120	0	123	119	-3.3
	0.5	119	119	0	122	120	-1.6
	1.0	118	119	0.8	121	120	-0.8
	3.0	119	119	0	120	120	0
	5.0	118	119	0.8	117	120	2.6

## Висновки

Параметри текстури Кернса, які є мірою відхилення осі гексагональної симетрії зерен від даного напрямку в полікристалічному зразку, знайшли з обернених полюсних фігур напрямку нормалі до площини листів и напрямку вальцювання для сплаву магнію з літєм Mg-5 % Li (мас.) після різних видів обробки: 1) екструзії при 350°C через прямокутну матрицю, 2) вальцювання зі зміною його напрямку на 90° та проміжного відпалу при 350°C після кожного проходу, 3) після подальшого знакозмінного вигину на 0,5; 1; 3 і 5 циклів.

Оцінки модуля пружності після вищезазначених видів обробки за допомогою знайдених параметрів текстури Кернса та констант пружності монокристалу сплаву Mg-5 % Li (мас.), взяті з [19], показали, що розрахункові та експериментальні значення модуля пружності листів сплаву відрізняються не більше ніж на 10 %.

Вирішена обернена задача визначення констант пружності монокристалу сплаву Mg 5 % Li (мас.) за параметрами текстури Кернса та експериментальними значеннями модуля пружності полікристалічних листів сплаву у напрямку вальцювання та поперечному напрямку після вищезазначених видів обробки. Встановлено, що усереднені значення модулів пружності монокристалу сплаву Mg-5 % Li (мас.) мають такі значення  $E_c = 56.5$  ГПа;  $E_a = 41.5$  ГПа і відрізняються від приведених у [20] не більше ніж 4.8 % і 7.5 %, відповідно.

Визначено межі міцності та плинності монокристалу сплаву Mg-5 % Li (мас.) за параметрами текстури Кернса та експериментальними значеннями відповідних механічних властивостей у напрямку вальцювання та поперечному напрямку після вищезазначених видів обробки полікристалічних листів сплаву. Встановлено, що усереднені значення меж міцності монокристала дослідженого сплаву

магнію вздовж його осей  $c$  ( $\sigma_{B\text{calc}}^c$ ) та  $a$  ( $\sigma_{B\text{calc}}^a$ ) мають такі значення:  $\sigma_{B\text{calc}}^c = 184$  МПа,  $\sigma_{B\text{calc}}^a = 178$  МПа, а усереднені значення меж плинності монокристала дослідженого сплаву магнію вздовж його осей  $c$  ( $\sigma_{0.2\text{calc}}^c$ ) та  $a$  ( $\sigma_{0.2\text{calc}}^a$ ) мають такі значення:  $\sigma_{0.2\text{calc}}^c = 122$  МПа,  $\sigma_{0.2\text{calc}}^a = 118$  МПа.

Показано, що результати розрахунків меж міцності та плинності листів сплаву Mg-5 % Li (мас.) у напрямку вальцювання та поперечному напрямку після різних вищезазначених видів обробки з використанням знайдених усереднених значень меж міцності та плинності монокристалу сплаву відрізняються від отриманих нами експериментальних величин не більше ніж на 8.1 % та 6.1 % для меж міцності та плинності, відповідно.

Представлені вище результати можуть бути застосовані для визначення характеристик монокристалів гексагональних матеріалів за результатами відповідних експериментальних даних полікристалів, оскільки отримання монокристалів, достатніх для виміру відповідних властивостей, часто є складною проблемою.

**Усов В.В.** – д. ф.-м. н. професор, професор кафедри технологічної та професійної освіти державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського»,  
**Шкатуляк Н.М.** – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедри фізики державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського»

**Совкова Т.С.** – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедри фізики державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського»;

**Рибак Н.І.** – аспірантка кафедри фізики державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського».

- [1] Magnesium alloys, FindPatent.ru, <http://www.findpatent.ru/patent/245/2456362.html> [in Russian].
- [2] M.A. Leeftang, J. Zhou, J. Duszczuk, Deformability and extrusion behavior of magnesium-lithium binary alloys for bio-medical applications, In K.U. Kainer (Ed.), Magnesium, Proceedings of the 8th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications, 1182 (2009). Weinheim, Germany: Wiley-VCH, – Web source: [http://www.3me.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/3mE/Over\\_de\\_faculteit/Afdelingen/Materials\\_Science\\_Engineering/MSE\\_News/scienceday2009/doc/M.A. Leeftang, J. Zhou and J. Duszczuk.pdf](http://www.3me.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/3mE/Over_de_faculteit/Afdelingen/Materials_Science_Engineering/MSE_News/scienceday2009/doc/M.A._Leeftang,_J._Zhou_and_J._Duszczuk.pdf)
- [3] C.O. Muga and Z.W. Zhang Strengthening, Mechanisms of Magnesium-Lithium Based Alloys and Composites, Advances in Materials Science and Engineering (2016) Article ID 1078187; <https://doi.org/10.1155/2016/1078187>.
- [4] C.Q. Li, Xu D.K., S Yu., L.Y. Sheng, E.H. Han, Effect of Icosahedral Phase on Crystallographic Texture and Mechanical Anisotropy of Mg-4%Li Based Alloys, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 33(5), 475 (2017); <https://www.amse.org.cn/article/2017/1006-7191/1006-7191-33-5-475.shtml>.
- [5] Sung-Yu Tsai and Jen-Yuan (James) Chang Design of deep learning on intelligent levelling system for industry 4.0 technology, MATEC Web of Conferences 185, 00026 (2018); <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818500026 ICPMMT 2018>.
- [6] J. Kearns, Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy (1965); <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/WAPDTM472.xhtml>.
- [7] D. Dzunovich, S. Betsofen, and P. Panin, Methodological aspects of the quantitative texture analysis of HCP Alloy (Ti, Zr) sheet semiproducts., Russian Metallurgy (Metally) 10, 813 (2017); <https://doi.org/10.1134/S0036029517100056>  
<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0036029517100056>.

- [8] J. Kearns, On the relationship among “F” texture factors for the principal planes of zirconium, hafnium and titanium alloys, *Journal of Nuclear Materials*, 299(2), 171 (2001); [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(01\)00686-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(01)00686-9).
- [9] V. Grytsyna, D. Malykhin, T. Yurkova et al., On Structural Aspects of Texture Changes During Rolling of Zr-2.5%Nb Alloy. *East European Journal of Physics* 3, 38 (2019); <https://periodicals.karazin.ua/eejp/article/view/14359/13506>.
- [10] V. Usov, N. Shkatulyak, E., N. Rybak, Elastic properties of alloy ZE10 sheets evaluation by Kerns texture parameters. *East Eur. J. Phys.* 1, 43 (2021), <https://periodicals.karazin.ua/eejp/article/view/16552>
- [11] Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impuls Excitation of Vibration; [http://forlab.pt/wp-content/uploads/2015/08/E1876\\_mvuj8965.pdf](http://forlab.pt/wp-content/uploads/2015/08/E1876_mvuj8965.pdf).
- [12] N. Shkatulyak, S. Smirnova, and V. Usov, Effect of Alternating Bending on Texture, Structure, and Elastic Properties of Sheets of Magnesium Lithium Alloy, Hindawi Publishing Corporation, *International Journal of Metals*, Article ID 349810, 8 pages, (2015); <http://dx.doi.org/10.1155/2015/349810>.
- [13] [H. Hafekamp, M. Niemeier, R. Bohem, U. Holzcamp, C. Jaschik and V. Kaese, Development, Processing and Applications Range of Magnesium Lithium Alloys, *Material Science Forum* 350-351, 31-42 (2000); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.350-351.31>.
- [14] P. R. Morris, *Journal of Applied Physics* 30(4) (1959); <https://doi.org/10.1063/1.1702413>.
- [15] J. F. Nye *Physical properties of crystals their representation. Their representation by tensors and matrices*, (Oxford: University Press, 2006).
- [16] Ya. D. Vishnyakov, A. A. Babareko , S. A. Vladimirov, I. V. Egiz, *The theory of texture formation in metals and alloys*, Nauka, Moscow, 1979, <https://ua1lib.org/book/2990475/783dc1?id=2990475&secret=783dc1>.
- [17] D. W. Hogan and D. J. Dyson, Angles between planes in the hexagonal and tetragonal crystal systems, *Micron*, 2, 59 (1970); [https://doi.org/10.1016/0047-7206\(70\)90045-2](https://doi.org/10.1016/0047-7206(70)90045-2).
- [18] V. Grytsyna, D. Malykhin, T. Yurkova et al. On Structural Aspects of Texture Changes During Rolling of Zr-2.5%Nb Alloy, *East Eur. J. Phys.* 3, 38 (2019); <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2019-3-05>.
- [19] N. Shkatulyak, E. Savchuk, V. Usov. Anisotropic damage of titanium plates under uniaxial tension after reverse bending. *J. Mater Res Technol.* 7, 11, 82 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.007>
- [20] N. Shkatulyak, V. Usov, S. Smirnova, *Single Crystal Magnesium Lithium Alloy Elastic* (4)1-11 (2015); <https://www.wireilla.com/eng/ijamse/papers/4415ijamse01.pdf>.

V. Usov, N. Shkatulyak, T. Sovkova, N. Rybak

## Single crystal characteristics of the Mg - 5% Li alloy, found from the polycrystalline experimental data and the Kearns texture parameters

*South Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushinsky,  
Str. Staroportofrankivska, 26, 65020 Odessa, Ukraine, [valentinusov67@gmail.com](mailto:valentinusov67@gmail.com)*

This work aimed to experimentally determine of the Kearns texture parameters, elastic moduli, mechanical properties (ultimate tensile strength and yield strength) of sheets of an alloy of Mg 5 wt. % Li after various types of processing: 1) extrusion at 350 ° C through a rectangular die; 2) rolling with a change in its direction by 90° and intermediate annealing at 350°C after each pass; 3) after the subsequent alternating bending (AB) by 0.5; one; 3 and 5 cycles and evaluation of the elastic and mechanical properties of the corresponding single crystal of the alloy under study using the indicated data. The moduli of elasticity and strength characteristics of the studied polycrystalline samples were determined in the rolling direction (RD) and transverse direction (TD). Using the found parameters of the Kearns texture and the elastic and mechanical properties of the sheets, the values of the elastic modules and the ultimate strength and yield strength of the single crystal of the above alloy were estimated. The found modules of elasticity of a single crystal of an alloy Mg-5 wt. % Li deviate from their values found in previous studies by no more than 7.5%. Elastic modules and strength characteristics of the studied samples of magnesium alloy Mg 5 wt. % Li calculated from the single crystal data deviate from the experimental data by no more than 10%.

**Keywords:** alloy Mg 5 wt. % Li, extrusion, rolling, alternating bending, Kerns texture parameters, elastic modulus, ultimate strength, conventional yield strength, single crystal.