

УДК 539.32

**ВПЛИВ ВИДУ ДЕФОРМАЦІЇ Й ТЕКСТУРИ НА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ  
ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ ZE10**В. В. УСОВ<sup>1</sup>, Н. М. ШКАТУЛЯК<sup>1</sup>, О. С. САВЧУК<sup>2</sup>, Н. І. РИБАК<sup>1</sup><sup>1</sup> Університет Ушинського, Одеса;<sup>2</sup> Національний університет "Одеська морська академія"

Досліджено вплив обробки екструзією з подальшим вальцюванням у поєднанні з відпалом та зміною напрямку після кожного проходу (вихідний лист) і знакозмінним вигином (ЗВ) за 0,5; 1; 3 та 5 cycles, а також текстури на параметр пошкодженості  $D$ , пружні та механічні властивості за одновісних випробувань на розтяг (границю міцності  $\sigma_B$ , умовну границю плинності  $\sigma_{0,2}$  та відносне видовження  $\Delta l/l$ ) сплаву магнію з цинком, цирконієм і рідкісноземельними металами ZE10. Параметри пошкодженості визначали зі змін модуля пружності після відповідної кількості циклів ЗВ відносно його значень у різних напрямках вихідного листа та розраховували за моделями еквівалентних деформації і пружної енергії. Встановлено, що усереднені за всіма напрямками в листах сплаву модулі пружності, границі міцності, умовні границі плинності та відносні видовження зменшуються, а відповідні параметри пошкодженості, навпаки, збільшуються зі зростанням кількості циклів ЗВ за параболічними законами. Анізотропія вищезазначених характеристик також зменшується під час знакозмінного вигину. Виявлено, що між параметрами текстури Кернса, з одного боку, та модулями пружності, параметрами пошкодженості, границею міцності, умовною границею плинності та відносним видовженням існують сильні кореляційні зв'язки. Отримано відповідні квадратичні рівняння регресії з високими значеннями коефіцієнтів надійності апроксимації. Показано, що вищезазначені зміни досліджуваних властивостей обумовлені, здебільшого, зміною кристалографічної текстури.

**Ключові слова:** екструзія, вальцювання, знакозмінний вигин, текстура, анізотропія, модуль Юнга, параметр пошкодженості, кореляція.

The effect of extrusion with subsequent rolling in combination with annealing and a change in rolling direction after each pass (original sheet) and reversible bending (RB) in the amount of 0.5; 1, 3 and 5 cycles, as well as texture on the elastic properties, damage parameter  $D$ , tensile strength  $\sigma_B$ , yield strength  $\sigma_{0,2}$  and relative elongation  $\Delta l/l$  of the magnesium alloy with zinc, zirconium and ZE10 rare earth metals were investigated. Damage parameters that characterized damage accumulation were determined by the change in the elastic modulus after the corresponding number of the RB cycles relative to its values in different directions of the investigated alloy original sheet. Damage parameters were calculated using the models of equivalent deformation and equivalent elastic energy. It was established that the values of the elastic modulus, tensile strength, conditional yield strength, and relative elongation averaged over all directions in the alloy sheets decreased, and the corresponding values of damage parameters, on the contrary, increased with increase in the number of RB cycles according to parabolic laws, as shown by correlation and regression analysis. The anisotropy of the above characteristics also decreased under reverse bending. It was found that there were strong correlation relationships between the Kearns texture parameters, on the one hand, and the elastic modulus, damage parameters, tensile strength, conditional yield strength, and elongation, on the other. The corresponding quad-

ratic regression equations with high values of the approximation reliability coefficients were obtained. Thus, it was shown that the aforementioned changes in the studied properties with a change in the number of the RB cycles were caused mainly by the crystallographic texture change.

**Keywords:** *extrusion, rolling, reverses bending, texture, anisotropy, Young's modulus, damage parameter, correlation.*

**Вступ.** Магній і його сплави є перспективними матеріалами, зокрема, в автомобільній та аерокосмічній галузях промисловості завдяки низькій густині та високій питомій міцності [1]. Основним недоліком чистого магнію та деяких його сплавів, наприклад, AZ31, що містить алюміній, цинк та цирконій, є низька здатність до формозмін за значних деформацій [2]. Крім того, магній, як і більшість металів з гексагональною кристалічною структурою, володіє суттєвою анізотропією механічних властивостей внаслідок утворення небажаних текстур, що обмежує його практичне використання. Магній та його сплави деформуються за багатьма механізмами ковзання (базисним, призматичним, пірамідальним), а також за допомогою певних типів двійникування. Механізми деформації залежать від співвідношення параметрів кристалічної ґратки  $c/a$  [3]. Відповідним легуванням магнію під час виготовлення сплавів можна отримати нові, які б володіли певним комплексом потрібних властивостей, зокрема стійким опором корозії та доброю здатністю до формозміни.

Раніше показано, що додавання рідкісноземельних металів (РЗМ) до сплавів Mg призводить до ослаблення текстури під час вальцювання або екструзії порівняно з іншими сплавами магнію. Для пояснення цього явища запропоновано низьку різних механізмів [4–6]. Показано [7], що незначні домішки РЗМ не тільки зменшують гостроту текстури, але й сприяють збільшенню пластичності й корозійної стійкості сплавів магнію.

Зазвичай листовий і рулонний метал перед використанням виправляють (випрямляють) на роликівих машинах знакозмінним вигином (ЗВ). Після такої обробки отримують плоский лист зі зменшеним рівнем залишкових напружень [8]. Під час ЗВ матеріал зазнає невеликої знакозмінної деформації, за якої відбуваються певні зміни текстури та мікроструктури [9].

Водночас раніше не досліджували пошкоджуваність листів сплаву ZE10, отриманих внаслідок деформації шляхом екструзії і подальшого вальцювання зі зміною його напрямку після кожного проходу в поєднанні з відпалом і знакозмінним вигином.

Як зазначено вище, ЗВ використовують для надання більшої площинності і зменшення залишкових напружень у листовому металі перед його використанням. При цьому під час деформації в металі накопичуються суб- і мікродфекти: точкові (вакансії і включення), лінійні (дислокації), поверхневі (субмікротріщини), об'ємні (мікропори). Об'єднання цих дефектів зі збільшенням деформації спричиняє утворення мікротріщин, які, об'єднуючись в основну тріщину, можуть призвести до руйнування [10, 11].

Для опису макроскопічної поведінки матеріалу під час деформації перспективною є концепція накопичення пошкоджень у механіці суцільних середовищ. Для характеристики накопичення пошкоджень використовують т. зв. параметр пошкоджуваності  $D$ , який запропонований раніше [10, 11] і розвивається дотепер [12–14]. Параметр пошкоджуваності  $0 \leq D \leq 1$  характеризує сукупність мікроструктурних змін у матеріалі, викликаних появою і накопиченням мікродфектів під дією робочих навантажень. Його інтерпретують як відносне зменшення ефективної несучої площі поперечного перерізу внаслідок накопичення пошкоджень. Деградація матеріалу викликана поступовим зменшенням ефективної площі, яка фактично несе навантаження за розтягу, і визначає опір зразка розтягуванню:

$$D = (S - S_0) / S_0, \quad (1)$$

де  $S_0$  і  $S$  – площа поперечного перерізу неушкодженого зразка і поточна, відповідно;  $S_0 - S$  – площа, зайнята мікропорожнинами та мікротріщинами.

За такої інтерпретації параметр пошкоджуваності можна отримати зі зміни модуля пружності. Відповідно до гіпотези еквівалентної деформації [12], параметр пошкоджуваності  $D_1$  можна знайти за співвідношенням

$$D_1 = 1 - (E / E_0), \quad (2)$$

де  $E_0$  і  $E$  – модуль пружності неушкодженого зразка й поточне значення модуля, відповідно.

Якщо використовувати модель еквівалентної пружної енергії [13], то можна визначити  $D_2$  як тензор четвертого рангу:

$$D_2 = 1 - (E / E_0)^{1/2}. \quad (3)$$

Лише один компонент тензора у формулі (3) відрізняється від нуля за одновісного розтягу [11]. Параметр пошкоджуваності  $D$  можна знайти за одновісного розтягу зі зміни пружних характеристик, з огляду на представницький елемент об'єму ортотропної симетрії. Маємо на увазі, що найскладніша анізотропія є ортотропною. Навіть за високої щільності взаємодіючих тріщин ефективні пружні властивості залишалися ортотропними з хорошою точністю [10]. Параметр пошкоджуваності на основі моделі еквівалентної деформації Леметра [9] має вищі значення порівняно з моделями на базі еквівалентної пружної енергії [13, 14], що дають дуже схожі числові значення [15]. Тому оцінка параметра пошкоджуваності  $D_2$  за співвідношенням (3) є кращою порівняно з (2) під час аналізу анізотропії пошкоджуваності листового матеріалу [15].

Кристалографічна текстура, яка формується під час пластичної деформації, також істотно впливає на накопичення структурних дефектів і, відповідно, пошкоджень [16]. Однак відсутність достатнього фізичного обґрунтування моделей (кінетичних рівнянь) породжує неоднозначність в експериментальних оцінках параметра пошкоджуваності  $D$  залежно від способу його визначення для одного і того ж зразка досліджуваного матеріалу [15]. Тому зв'язок параметра пошкоджуваності зі зміною структурного стану і текстурою під дією зовнішніх впливів поки можна отримати тільки на основі відповідного кореляційного й регресійного аналізів.

Мета роботи – дослідити вплив екструзії з подальшим вальцюванням і знакозмінним вигином, а також текстури на параметр пошкоджуваності  $D$ , пружні та механічні властивості за одновісних випробувань на розтяг (границю міцності  $\sigma_B$ , умовну границю плинності  $\sigma_{0,2}$  та відносне видовження  $\Delta l/l$ ) сплаву магнію з цинком, цирконієм і РЗМ ZE10.

**Матеріал і методи дослідження.** Листи сплаву ZE10 (1,3% Zn, 0,15% Zr, 0,2% РЗМ, в основному церій) отримали обробкою [17], яка складалася з екструзії злитка за температури 350°C, після якої одержали сляб завтовшки 6 mm і завширшки 60 mm. Далі сляб послідовно вальцювали в поздовжньому напрямку до товщини 4,5 mm за два проходи в поєднанні з нагріванням до 350°C після кожного проходу. Подальше вальцювання до товщини 2 mm здійснювали у поперечному напрямку разом з нагріванням до 350°C після кожного проходу. Ступінь деформації за кожний прохід ~ 10%. Від 2 mm товщини змінювали напрямок вальцювання на 90° після кожного проходу зі ступенем деформації ~ 10% в поєднанні з нагрівом до 350°C, і так отримали листи завтовшки 1 mm (вихідні листи).

Знакозмінний вигин моделювали на ручному згинальному пристрої з трьома роликками  $\varnothing$  50 mm. Швидкість руху металу за вигину ~ 150 mm/s. Досліджували після 0,5; 1; 3 і 5 cycles. Один цикл ЗВ складався зі згину в один бік (0,25 cycle),

випрямлення до плоского стану (0,5 cycle), згину в іншій бік (0,75 cycle) і випрямлення.

Модуль Юнга вимірювали динамічним методом за частотою власних згинальних коливань плоских зразків довжиною 100 mm і шириною 10 mm, вирізаних під кутами з кроком 15° від напрямку вальцювання (НВ) до поперечного напрямку (ПН). Похибка не перевищувала 1% [17].

З вихідного листа та з листів після вигину за 0,5; 1; 3 і 5 cycles вирізали по три серії зразків для механічних випробувань у НВ, діагональному напрямку (ДН), тобто під кутом 45° до НВ, і ПН, а також зразки для дослідження текстури.

Механічні випробути виконували на розривній машині Zwick Z250/SN5A з силовим давачем на 20 kN за кімнатної температури для зразків, вирізаних у НВ, ПН і ДН. Загальна довжина зразків 90 mm. Довжина і ширина робочої частини зразків 30 і 12,5 mm, відповідно. За значення механічних властивостей брали усереднені за трьома серіями випробувань зразків у кожному напрямку.

Перед дослідженням текстури зразки хімічно полірували на глибину 0,1 mm для зняття спотвореного поверхневого шару. Кристалографічну текстуру досліджували з двох поверхонь зразків після вищенаведеної кількості циклів ЗВ за допомогою зйомки обернених полюсних фігур у напрямку нормалі (НН ОПФ) і напрямку вальцювання (НВ ОПФ) на дифрактометрі ДРОН-3м у фільтрованому  $MoK_{\alpha}$ -випромінюванні. Зразок без текстури виготовили з дрібної рекристалізованої тирси досліджуваного сплаву. Під час побудови ОПФ застосовували нормування за Морісом [18].

**Результати та їх обговорення.** На рисунку подані ОПФ досліджуваного сплаву. Видно, що текстура вихідного зразка сплаву ZE10 (рисунок *a, b*) характеризується широким переважальним розсіюванням нормалей до базисних площин у ПН з максимальним кутом відхилення 90° і проміжними максимумами відхилення гексагональної призми від НН як у бік ПН на 40°, так і в бік НВ на 40°, на відміну від текстури, яка зазвичай формується в Mg, Ti і Zr. Характер розсіювання текстури і полюсна щільність на ОПФ сплаву ZE10 змінюються залежно від кількості циклів ЗВ (рисунок *c-l*). Подібні зміни текстури на певній стадії ЗВ свідчать про деформаційні процеси ковзання і двійникування [9]. Для кількісної оцінки текстури гексагональних матеріалів часто використовують коефіцієнти текстури Кернса [19]. Ці коефіцієнти  $f_j$  (індекс  $j$  означає відповідний напрям у зразку (НН, НВ або ПН)) показують ступінь збігу  $c$ -осей кристалічної гексагональної комірки зерен зі заданим геометричним напрямком у полікристалічному матеріалі і їх можна знайти з ОПФ за співвідношенням

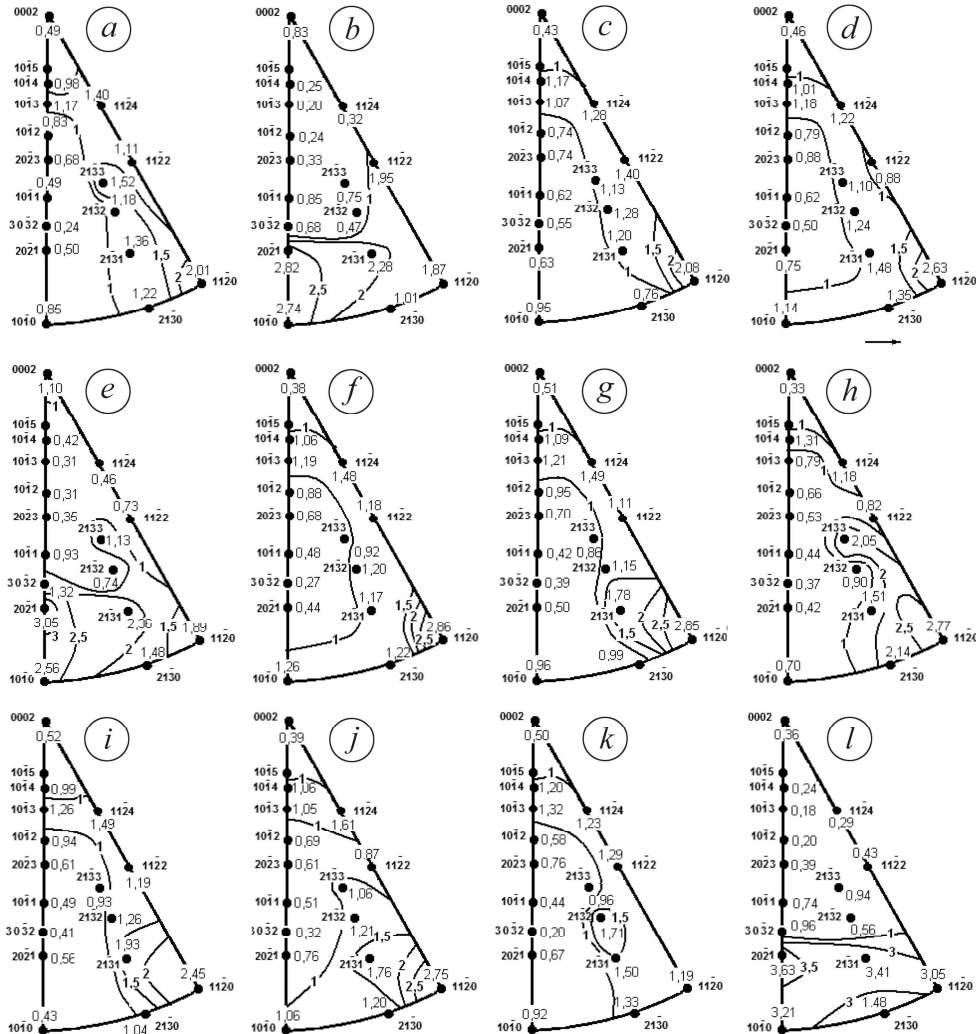
$$f_j = \left\langle \cos^2 \alpha_i \right\rangle_j = \sum_i A_i P_{ji} \cos^2 \alpha_i, \quad (4)$$

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

рефлексу до відповідної інтегральної інтенсивності  $I_R$   $i$ -го рефлексу зразка без текстури на  $j$ -ій ОПФ;  $A_i$  – статистичні ваги  $i$ -го рефлексу ( $\sum A_i P_{ji} = 1$ ) [18].

Умовно  $A_i$  визначають як частку площі поверхні стереографічного трикутника навколо нормалі та  $i$ -го рефлексу відповідної ОПФ;  $\alpha_i$  – кут відхилення  $i$ -го кристалографічного напрямку від осі  $c$  для  $j$ -го напрямку в зразку. Для знаходження текстурних коефіцієнтів Кернса використовували ОПФ на рисунку, значення взяті з праці [20]. Для розрахунку кутів  $\alpha_i$  за відомими формулами [21] потрібно знати відношення параметрів кристалічної ґратки  $c/a$  досліджуваного сплаву. Для сплаву магнію ZE10  $c/a = 1,622$ . Аналогічний результат отримали також автори

праці [22]. Виявлено невідповідності у розподілі полюсної щільності на НН ОПФ протилежних сторін листів після відповідної кількості циклів ЗВ (рисунок *c, d, f-k*). Це пов'язано з тим, що на опуклій стороні листів на поверхневі шари діє розтягувальна деформація (рисунок *d, f, h, g*), а на шари на протилежному боці – деформація стиску (рисунок *c, g, i, k*). Подібні розбіжності виявили раніше [23] під час дослідження характеристик кристалографічної текстури смуг сплаву Zr–2,5% Nb, які вирізали з трубки і потім випрямили.



Експериментальні обернені полюсні фігури сплаву ZE10: вихідний лист (*a, b*); листи після знакозмінного вигину за 0,5 (*c-e*); 1 (*f, g*); 3 (*h, i*); 5 (*g-l*) cycles; *b, e, l* відповідає напрямку вальцювання; *a, c, d, f-k* – напрямку нормалі до площини вальцювання; *d, f, h, j* – розтягнута сторона листів; *c, g, i, k* – стиснута.

Experimental inverse pole figures of ZE10 alloy: original sheet (*a, b*); sheets after reverse bending by 0.5 (*c-e*); 1 (*f, g*); 3 (*h, i*); 5 (*g-l*) cycles; *b, e, l* corresponds to the rolling direction; *a, c, d, f-k* corresponds to the normal direction to the rolling plane; *d, f, h, j* – the stretched side of the sheets; *c, g, i, k* – the compressed side of the sheets.

Виявлені невідповідності в розподілі полюсної щільності на НН ОПФ протилежних сторін листів досліджуваного сплаву після різної кількості циклів ЗВ

закономірно вплинули на відповідні текстурні коефіцієнти Кернса (табл. 1). Текстурний коефіцієнт Кернса  $f_{ND}$  вихідного листа досліджуваного сплаву, а також усереднені за двома сторонами листів  $f_{ND}^{av}$  після різної кількості циклів ЗВ використали для подальшого аналізу зв'язку їх значень з усередненими за всіма напрямками листів значеннями модуля Юнга  $E$ , границі міцності, умовної границі плинності, відносного видовження та параметрами пошкоджуваності  $D_1$  та  $D_2$  (розрахованими за співвідношеннями (2) та (3), відповідно).

**Таблиця 1. Коефіцієнти текстури Кернса листів сплаву ZE10, розраховані за ОПФ на рисунку**

Кількість циклів знакозмінного вигину															
0		0,5				1			3			5			
$f_{ND}$	$f_{RD}$	$f_{ND}^1$	$f_{ND}^2$	$f_{ND}^{av}$	$f_{RD}$	$f_{ND}^1$	$f_{ND}^2$	$f_{ND}^{av}$	$f_{ND}^1$	$f_{ND}^2$	$f_{ND}^{av}$	$f_{ND}^1$	$f_{ND}^2$	$f_{ND}^{av}$	$f_{RD}$
0,340	0,176	0,322	0,324	0,323	0,203	0,322	0,318	0,320	0,326	0,306	0,316	0,323	0,315	0,319	0,153

Модулі пружності  $E$ , параметри пошкоджуваності  $D_1$  і  $D_2$ , границі міцності  $\sigma_B$ , умовні границі плинності  $\sigma_{0,2}$  та відносне видовження  $\Delta l/l$  для різних напрямків вихідного листа та після різної кількості циклів ЗВ досліджуваного сплаву, а також відповідні коефіцієнти анізотропії  $\eta$  подані у табл. 2–7. Коефіцієнти анізотропії  $\eta$  обчислили за співвідношенням

$$\eta = [(F_{max} - F_{min}) / F_{min}] \cdot 100\% , \quad (5)$$

де  $F$  – значення відповідної властивості.

**Таблиця 2. Модуль пружності  $E$  і коефіцієнт анізотропії  $\eta$  після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10**

Кут з НВ, degree	Кількість циклів знакозмінного вигину									
	0		0,5		1		3		5	
	$E$ , GPa	$\eta$ , %	$E$ , GPa	$\eta$ , %	$E$ , GPa	$\eta$ , %	$E$ , GPa	$\eta$ , %	$E$ , GPa	$\eta$ , %
0	46,3	7,4	46	7,0	45,8	7,0	45	5,9	44,8	5,4
15	44,3		44		43,8		43,5		43,7	
30	43,5		43,1		43		43,1		42,8	
45	43,1		43		42,8		42,7		42,5	
60	43,3		43,2		43		42,5		42,5	
75	43,6		43,5		43,1		43		42,8	
90	43,9		43,8		43		43,3		43,3	
Середнє значення	44,0		7,4		43,8		7,0		43,5	

Маємо анізотропію модуля пружності як у вихідному листі досліджуваного сплаву, так і після знакозмінного вигину. Вона максимальна (7,4%) у вихідному листі. Зі збільшенням кількості циклів ЗВ анізотропія зменшується. Мінімальну (5,4%) спостерігаємо після 5 cycles ЗВ (табл. 3). Усереднені модулі пружності  $E$  зменшуються від 44 GPa у вихідному листі до 43,2 GPa після 5 cycles ЗВ

(табл. 2). Аналіз показав, що існує кореляція між усередненим за напрямком значенням модуля пружності  $E_{av}$  та кількістю  $n$  циклів ЗВ. Відповідне рівняння регресії та коефіцієнт надійності наближення  $R^2$  мають вигляд

$$E_{av} = 0,05n^2 - 0,38n + 43,96; \quad R^2 = 0,95. \quad (6)$$

Для дослідження впливу знакозмінного вигину на параметри пошкоджуваності  $D_1$  і  $D_2$  вважатимемо, що вихідні зразки досліджуваного сплаву не мають пошкоджень і характеризуються модулями пружності  $E_0$ , а після відповідної кількості циклів ЗВ – модулями пружності  $E$ .

Параметри пошкоджуваності  $D_1$  і  $D_2$ , знайдені за співвідношеннями (2) і (3), відповідно, подані в табл. 3, 4. Як бачимо, існує анізотропія цих параметрів. Максимальні значення коефіцієнтів (303,7% та 304,3% для  $D_1$  і  $D_2$ , відповідно) спостерігаємо після 0,5 cycle ЗВ. Зі збільшенням кількості циклів ЗВ їх анізотропія зменшується. Мінімальну (132,7% та 133,8% для  $D_1$  і  $D_2$ , відповідно) спостерігаємо після 5 cycles ЗВ.

Параметри пошкоджуваності, усереднені за всіма напрямками листів,  $D_1^{av}$  та  $D_2^{av}$ , збільшуються зі зростанням кількості циклів ЗВ (табл. 3, 4). Аналіз показав значущі кореляційні зв'язки між усередненими за напрямками листів досліджуваного сплаву параметрами пошкоджуваності  $D_1^{av}$  та  $D_2^{av}$ , з одного боку, й кількістю циклів ЗВ, з іншого. Відповідні рівняння регресії і коефіцієнти надійності апроксимації  $R^2$  мають вигляд

$$D_1^{av} = -0,11n^2 + 0,87n + 0,10; \quad R^2 = 0,95, \quad (7)$$

$$D_2^{av} = -0,06n^2 + 0,44n + 0,05; \quad R^2 = 0,95. \quad (8)$$

**Таблиця 3. Параметри пошкоджуваності  $D_1$  і коефіцієнти анізотропії  $\eta$  після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10**

Кут з НВ, degree	Кількість циклів знакозмінного вигину									
	0		0,5		1		3		5	
	$D_1 =$ $= (E-E_0)/E_0$	$\eta$	$D_1$	$\eta$	$D_1$	$\eta$	$D_1$	$\eta$	$D_1$	$\eta$
0	0	0	0,65	303,7	1,08	195,9	2,81	142,0	3,24	132,7
15			0,68		1,13		1,81		1,35	
30			0,92		0,69		0,92		1,61	
45			0,23		0,46		0,93		1,39	
60			0,23		1,39		1,85		1,85	
75			0,23		1,15		1,38		1,83	
90			0,23		2,05		1,37		1,37	
Середнє значення	0	0	0,45	303,7	1,14	195,9	1,59	142,0	1,82	132,7

Результати механічних випробувань подані в табл. 5–7. Спостерігаємо анізотропію границі міцності, умовної границі плинності та відносного видовження як у вихідних листах досліджуваного сплаву, так і після знакозмінного вигину. Так, для границі міцності максимальне значення коефіцієнта анізотропії  $\eta$  у вихідно-

му листі 13,9%. Зі збільшенням кількості циклів ЗВ  $\eta$  зменшується, досягаючи мінімального значення (9,4%) після 3 cycles ЗВ. Після 5 cycles ЗВ коефіцієнт анізотропії збільшився до 12,1%.

**Таблиця 4. Параметри пошкоджуваності  $D_2$  і коефіцієнти анізотропії  $\eta$  після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10**

Кут з НВ, degree	Кількість циклів знакозмінного вигину									
	0		0,5		1		3		5	
	$D_2 =$ $=1 - (E/E_0)^{1/2}$	$\eta$	$D_2$	$\eta$	$D_2$	$\eta$	$D_2$	$\eta$	$D_2$	$\eta$
0	0	0	0,32	304,4	0,54	195,5	1,41	145,3	1,63	133,8
15			0,34		0,57		0,91		0,68	
30			0,46		0,35		0,58		0,81	
45			0,12		0,23		0,58		0,705	
60			0,12		0,70		0,93		0,93	
75			0,11		0,58		0,46		0,929	
90			0,11		1,03		0,69		0,69	
Середнє значення			0		0		0,23		304,4	

Усереднена за всіма напрямками листа границя міцності росте від 231,2 МПа (у вихідному листі) до максимального значення 237 МПа (після 3 cycles ЗВ), а після 5 cycles ЗВ зменшується до 234 МПа (табл. 5).

**Таблиця 5. Границя міцності  $\sigma_B$  і коефіцієнт анізотропії  $\eta$  після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10**

Кут з НВ, degree	Кількість циклів знакозмінного вигину									
	0		0,5		1		3		5	
	$\sigma_B$ , МПа	$\eta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\eta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\eta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\eta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\eta$ , %
0	246	13,9	250	13,1	252	12	256	9,4	250	12,1
45	231		219		219		221		229	
90	216		221		225		234		223	
Середнє значення	231,2	13,9	230	13,1	232	12	237	9,4	234	12,1

Умовна границя плинності вихідного листа досліджуваного сплаву характеризується суттєвою анізотропією (90%). Під час знакозмінного вигину зі збільшенням кількості циклів анізотропія умовної границі плинності суттєво зменшується до мінімального значення (12,4% після 3 cycles ЗВ). Після 5 cycles ЗВ коефіцієнт анізотропії знову збільшився до 29,2%. Умовна границя плинності, усереднена за всіма напрямками листів, зменшилася від 120 МПа у вихідному листі до 98 МПа зі збільшенням кількості циклів ЗВ від 0 до 5 (табл. 6).



**Таблиця 6. Умовна границя плинності  $\sigma_{0,2}$  і коефіцієнт анізотропії  $\eta$  після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10**

Кут з НВ, degree	Кількість циклів знакозмінного вигину									
	0		0,5		1		3		5	
	$\sigma_{0,2}$ , MPa	$\eta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , MPa	$\eta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , MPa	$\eta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , MPa	$\eta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , MPa	$\eta$ , %
0	174		174		102		89		115	
45	132	90,2	99	97,7	88	14,6	100	12,4	89	29,2
90	91,5		88		89		96		90	
Середнє значення	132,5	90,2	120,3	97,7	93	14,6	95	12,4	98	29,2

Анізотропія відносного видовження досліджуваного сплаву зростає від 42,7% у вихідному листі до максимального значення (90,5%) після 1 cycle ЗВ. Зі збільшенням кількості циклів ЗВ  $\Delta/l$  зменшується до мінімуму (20,8% після 5 cycles ЗВ). Величина  $(\Delta/l)_{av}$ , усереднена за всіма напрямками листів, має максимальне значення (29%) після 0,5 cycle знакозмінного вигину, досягаючи мінімального значення 24,9% після 3 cycles ЗВ, а після 5 cycles ЗВ збільшується до 26% (табл. 7).

**Таблиця 7. Відносне видовження  $\Delta/l$  і коефіцієнт анізотропії  $\eta$  після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10**

Кут з НВ, degree	Кількість циклів знакозмінного вигину									
	0		0,5		1		3		5	
	$\Delta/l$	$\eta$	$\Delta/l$	$\eta$	$\Delta/l$	$\eta$	$\Delta/l$	$\eta$	$\Delta/l$	$\eta$
	%									
0	23,4		21,0		20,5		19,1		29,0	
45	28,0	42,7	36,1	71,9	19,1	90,5	35,6	43,8	25,0	20,8
90	33,4		32,6		36,4		20,0		24,0	
Середнє значення	28,3	42,7	29,0	71,9	25,3	90,5	24,9	43,8	26,0	20,8

Аналіз показав, що існує кореляція між усередненим за напрямком значенням границі міцності  $\sigma_B^{av}$ , умовної границі плинності  $\sigma_{0,2}^{av}$  і відносного видовження  $(\Delta/l)_{av}$ , з одного боку, та кількістю циклів ЗВ, з іншого. Відповідне рівняння регресії та коефіцієнти надійності наближення мають вигляд

$$\sigma_B^{av} = -0,57n^2 + 3,77n + 229,67; \quad R^2 = 0,78, \quad (9)$$

$$\sigma_{0,2}^{av} = 4,00n^2 - 35,67n + 128,19; \quad R^2 = 0,78, \quad (10)$$

$$(\Delta/l)_{av} = 0,42n^2 - 2,63n + 28,70; \quad R^2 = 0,71. \quad (11)$$

Відомо, що однією з головних причин виникнення анізотропії фізико-механічних властивостей полікристалічних металевих матеріалів є кристалографічна текстура, яка утворюється за деформації. Як згадували вище, коефіцієнти текстури Кернса часто використовують для кількісної оцінки текстури гексагональних матеріалів [23].

Проаналізуємо анізотропію характеристик та їхні зміни (табл. 2–7) в зв'язку з кристалографічною текстурою, поданою за допомогою коефіцієнтів текстури Кернса  $f_{ND}$  для вихідного листа та  $f_{ND}^{av}$ , усереднених за двома сторонами листів після відповідної кількості циклів ЗВ (див. табл. 1). Аналіз свідчить, що між усередненими за всіма напрямками листів модулями пружності, параметрами пошкоджуваності, механічними характеристиками, з одного боку, та вищезазначеними коефіцієнтами текстури Кернса, з іншого, простежуються кореляційні зв'язки. Відповідні рівняння регресії й коефіцієнти надійності апроксимації подано співвідношеннями

$$E_{av} = -2149,3 \left( f_{ND}^{av} \right)^2 + 14440 f_{ND}^{av} - 198,5; \quad R^2 = 0,83, \quad (12)$$

$$D_1^{av} = 4901 \left( f_{ND}^{av} \right)^2 - 3292,6 f_{ND}^{av} + 552,9; \quad R^2 = 0,83, \quad (13)$$

$$D_2^{av} = 2450,8 \left( f_{ND}^{av} \right)^2 - 1646,6 f_{ND}^{av} + 276,5; \quad R^2 = 0,83, \quad (14)$$

$$\sigma_B^{av} = 45497 \left( f_{ND}^{av} \right)^2 - 30092 f_{ND}^{av} + 5209,9; \quad R^2 = 0,98, \quad (15)$$

$$\sigma_{0,2}^{av} = -79175 \left( f_{ND}^{av} \right)^2 + 53723 f_{ND}^{av} - 8980,5; \quad R^2 = 0,83, \quad (16)$$

$$\left( \Delta l / l \right)_{av} = -20937 \left( f_{ND}^{av} \right)^2 + 13902 f_{ND}^{av} - 2278; \quad R^2 = 0,76. \quad (17)$$

## ВИСНОВКИ

Текстура вихідного листа сплаву ZE10 характеризується широким розсіюванням підвищеної полюсної щільності нормалей до базисних площин у ПН із максимальним кутом відхилення від НН на  $90^\circ$  і проміжними максимумами відхилення гексагональної призми від НН як у бік ПН на  $40^\circ$ , так і у бік НВ на  $40^\circ$ , на відміну від текстури, яка зазвичай формується в Mg, Ti і Zr. Виявлено анізотропію модуля пружності, параметрів пошкоджуваності, границі міцності, умовної границі плинності та відносного видовження як у вихідному листі сплаву ZE10, так і після знакозмінного вигину. Зі збільшенням кількості циклів ЗВ анізотропія досліджених характеристик зменшується. Показано, що модулі пружності, усереднені за всіма напрямками в листах, зменшуються, а параметри пошкоджуваності, границя міцності, умовна границя плинності та відносне видовження, навпаки, збільшуються з ростом від 0 до 5 cycles знакозмінного вигину. Зміни модуля пружності, параметрів пошкоджуваності, механічних властивості за одновісних випробувань на розтяг обумовлені, здебільшого, кристалографічною текстурою листів сплаву ZE10, яка формується під час термомеханічної обробки і подальшого знакозмінного вигину. Подані результати можна використати для розроблення технології отримання тонких листів сплавів магнію з цинком, цирконієм і додатками рідкісноземельних металів з поліпшеними характеристиками формозміни та мінімальною анізотропією механічних характеристик.

1. *Review on research and development of magnesium alloys* / Z. Yang, J. P. Li, J. X. Zhang, G. W. Lorimer, and J. Robson // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2008. – **21**, № 5. – P. 313–328. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100671910860054X>
2. *Effect of Li addition on the mechanical behavior and texture of the as-extruded AZ31 magnesium alloy* / R. Li, F. Pan, B. Jiang, H. Dong, and Q. Yang // *Mater. Sci. & Engng: A*. – 2013. – **562**, № 1. – P. 33–38. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.032>

3. *Alaneme K. K. and Okoleta E. A.* Enhancing plastic deformability of Mg and its alloys – A review of traditional and nascent developments // *J. of Magnesium and Alloys*. – 2017. – **5**, № 4. – P. 460–475. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.11.001>
4. *Influence of cerium on the texture and ductility of magnesium extrusions / R. K. Mishra, A. K. Gupta, P. R. Rao, A. K. Sachdev, A. M. Kumar, and A. A. Luo* // *Scripta Mater.* – 2008. – **59**, № 5. – P. 562–565. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135964620800362X>
5. *Mackenzie L. W. F. and Pekguleryuz M. O.* The recrystallization and texture of magnesium–zinc–cerium alloys // *Scripta Mater.* – 2008. – **59**, № 6. – P. 665–668. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646208003874>
6. *Stanford N. and Barnett M.* Effect of composition on the texture and deformation behavior of wrought Mg alloys // *Scripta Mater.* – 2008. – **58**, № 3. – P. 179–1829. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646207006938>
7. *Robson J. D.* Critical Assessment 9: Wrought magnesium alloys // *Mater. Sci. and Technol.* – 2015. – **31**, № 3. – P. 257–264. – URL: <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000683>
8. *Methods of leveling sheet metal* // *ARKU Magazine* – URL: <https://www.arku.com/us/arku-magazine/detail/sheet-metal-leveling-methods-us/>
9. *Effect of reverse bending on texture, structure, and mechanical properties of sheets of magnesium alloys with zinc and zirconium / N. M. Shkatulyak, V. V. Usov, N. A. Volchok, A. A. Bryukhanov, S. V. San'kova, M. Rodman, M. Shaper, and C. Klose* // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2014. – **115**, № 6. – P. 609–616. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X1406012X>
10. *Качанов Л. М.* Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 312 с.
11. *Работнов Ю. Н.* Избранные труды. – М.: Наука, 1991. – 196 с.
12. *Lemaitre J. and Desmorat R.* Anisotropic damage law of evolution // *Eur. J. Mech. A/Solids*. – 2000. – **19**, № 2. – P. 187–208. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997753800001613>
13. *Hansen N. R. and Schreyer H. L.* A thermodynamically consistent framework for theories of elastoplasticity coupled with damage // *Int. J. Solid. Struct.* – 1994. – **31**, № 3. – P. 359–389. – URL: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)90112-0)
14. *Chow C. L. and Wang J.* An anisotropic theory of elasticity for continuum damage mechanics // *Int. J. of Fract.* – 1987. – **33**, № 1. – P. 3–16. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00034895>
15. *Bobyry M., Khalimon O., and Bondarets O.* Phenomenological damage models of anisotropic structural materials // *J. of Mechanical Engng NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*. – 2013. – № 67. – P. 5–13. – URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_mash\\_2013\\_67\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2013_67_3)
16. *Usov V. V. and Shkatulyak N. M.* Fractal nature of the dislocation structure of low-alloyed steel after controlled rolling // *Russian Physics J.* – 2004. – **47**, № 11. – P. 1139–1146. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11182-005-0044-y>
17. *WIPO Patent Application WO/2011/146970*. – URL: <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Magnesium-based-alloy-wrought-applications/WO2011146970A1.html>
18. *Morris P. R.* Reducing the effects of nonuniform pole distribution in inverse pole figure studies // *J. of Appl. Physics*. – 1959. – **30**, № 4. – P. 595–596. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.1702413>
19. *Kearns J. J.* Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy. – URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/WAPDTM472.xhtml>
20. *Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабарэко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз*. – М.: Наука, 1979. – 343 с.
21. *Миркин Л. И.* Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Физматгиз, 1961. – 863 с.
22. *Liu Y., Li W., and Li Y.* Microstructure and mechanical properties of ZE10 magnesium alloy prepared by equal channel angular pressing // *Int. J. of Minerals, Metallurgy and Material*. – 2009. – **16**, № 5. – P. 559–563. – URL: [https://doi.org/10.1016/S1674-4799\(09\)60096-0](https://doi.org/10.1016/S1674-4799(09)60096-0)
23. *On structural aspects of texture changes during rolling of Zr–2.5% Nb alloy / V. Grytsyna, D. Malykhin, T. Yurkova, K. Kovtun, T. Chernyayeva, G. Kovtun, I. Tantsura, V. Voyevodin* // *East Eur. J. Phys.* – 2019. – № 3. – P. 38–45. – URL: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2019-3-05>

Одержано 23.04.2020