

В.В. Усов¹, Н.М. Шкатуляк¹, О.С. Савчук², Н.І. Рибак¹

Параметри текстури Кернса, механічні властивості та пошкоджувальність титанових листів після знакозмінного вигину

¹Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського, Одеса, Україна, valentinusov67@gmail.com

²Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна, z9816@yandex.ua

Метою даної роботи є визначення параметрів текстури Кернса і оцінка на їх основі модулів пружності, механічних властивостей при випробуваннях на одновісний розтяг (межа міцності, умовна межа плинності), а також параметрів пошкоджувальності листів титану марки 1 (0,04 % Fe; 0,015 % C; 0,05 % N 0,05 % V; 0,009 % H) в стані поставки після вальцювання і відпалу при 840°C (вихідний лист) і подальшого знакозмінного вигину (ЗВ) в кількості 0,5; 1, 3 і 5 циклів. Параметри пошкоджувальності, що характеризують накопичення пошкоджень, визначали зі зміни модуля пружності після вищезазначеного числа циклів ЗВ відносно значень модуля пружності в різних напрямках вихідного листа досліджуваного сплаву. Константи пружності монокристалів і розраховані параметри текстури Кернса використано для оцінки модуля пружності в напрямку вальцювання (НВ) і поперечному напрямку (ПН) вихідного листа, а також листів після зазначеного вище числа циклів ЗВ. Відхилення розрахункових й експериментальних значень модуля пружності не перевищило 5 %. Відхилення розрахункових і експериментальних значень межі міцності і межі текучості досліджуваних листів полікристалічного титану в НВ і ПН, як в початковому стані, так і після відповідної кількості циклів ЗВ не перевищували 10 %.

Ключові слова: параметри текстури Кернса, модуль пружності, межа міцності, умовна межа плинності, параметр пошкоджувальності.

Подано до редакції 10.05.2021; прийнято до друку 25.08.2021.

Вступ

Широке застосування титану і його сплавів в авіації і ракетній техніці обумовлено його відносно низькою густиною при високій питомій міцності. Гексагональна кристалічна структура зерен полікристалічного титану сприяє розвитку анізотропії напівфабрикатів внаслідок формування кристалографічної текстури в процесі обробки. Анізотропія напівфабрикатів може обмежувати практичне застосування титану і його сплавів, збільшуючи кількість браку у виробках (наприклад, утворення фестонів при штампуванні). Однак, текстура може служити не тільки джерелом браку у виробках. Створення певної текстури в металевому матеріалі дозволяє істотно підвищити міцність виробів. Наприклад, створення сприятливої текстури

в титановому сплаві ВТ5-1 дозволяє збільшити опір деформації при двовісному розтягуванні на 45 % у порівнянні з одноосовим [1]. Більшість сучасних технологій обробки листового металу передбачає механічний або термічний вплив, що неминує викликає утворення внутрішніх напружень в матеріалі. Ступінь вираження подібних явищ залежить від хімічного складу, вихідного напруженого стану металу, а також ряду інших характеристик. Як наслідок виникає цілий ряд складнощів, пов'язаних з подальшою обробкою подібних деталей, отриманням заданої геометрії, і відомому браку продукції. Перед використанням рулонного металу застосовують правку (випрямлення) на роликівих правильних машинах. При правці матеріал піддається знакозмінному вигину (ЗВ), що забезпечує на виході хороші

показники площинності. Така обробка дозволяє зменшити внутрішні напруження металу, надати йому необхідні площинні характеристики, що значно полегшує подальшу обробку і позитивно впливає на якість готової продукції [2]. Внаслідок відносно малій пластичній деформації в процесі правки, відбувається зміна структури металу і його механічних характеристик, що часто не враховується в подальшому. Таким чином, є актуальним дослідження впливу знакозмінного вигину на фізико-механічні властивості титану та його сплавів.

Вивченню впливу знакозмінного вигину при правці титанових листів присвячено обмежена кількість робіт. Так в [3] в процесі знакозмінного вигину листів з титану виявлено періодична зміна текстури від $\{11\bar{2}4\}\{11\bar{2}0\}$ до орієнтування $\{10\bar{1}4\}\{11\bar{2}0\}$ і назад, кількості і типів двійників деформації в мікроструктурі, формуванні базисних компонентів текстури. Показано, що основні зміни механічних властивостей і структури відбуваються в процесі перших трьох - п'яти циклів ЗВ. Встановлено лінійні кореляційні зв'язки між усередненими величинами полюсної щільності $P_{11\bar{2}4}$ як найбільш інтенсивного компонента текстури на обернених полюсних фігурах (ОПФ) напрямку нормалі (НН) до площини вальцювання досліджених листів титану, з одного боку, і усередненими за напрямками значеннями $\sigma_{0,2}$ і σ_B , з іншого боку, з коефіцієнтами надійності апроксимації 0,83 і 0,88, відповідно. У [4] вивчено вплив ЗВ і кристалографічної текстури на анізотропію параметра пошкоджуваності ω промислових титанових листів після знакозмінного вигину при наступних випробуваннях на одноосовий розтяг. Оцінювались пошкодження, викликані напруженістю межі плинності й межі міцності. Показано, що параметр пошкоджуваності збільшується зі зростанням кількості циклів знакозмінного вигину. Виявлено кореляції анізотропії параметра пошкоджуваності та механічних характеристик із сумарною величиною полюсної щільності, що перевищує одиницю на обернених полюсних фігурах напрямку нормалі (ОПФ НН) до площини листів.

Параметри текстури Кернса більш об'єктивно описують текстуру матеріалів з гексагональної структурою [5-7]. Крім того, параметри текстури Кернса дозволяють оцінити величину фізико-механічних властивостей (наприклад, пружних) полікристалічного матеріалу з гексагональною структурою за відомими характеристиками відповідного монокристалу [8].

Метою даної роботи було визначення параметрів текстури Кернса й оцінка на їх основі модуля пружності, механічних властивостей при випробуваннях на одноосовий розтяг (межа міцності, умовна межа плинності), а також параметри пошкоджуваності листів комерційного титану марки 1 (СТ-Grade 1), як в стані поставки після вальцювання та відпалу при 840° С (вихідний лист), так і листів після знакозмінного вигину (ЗВ) у кількості 0,5; 1, 3 і 5 циклів.

I. Матеріал і методи дослідження

Матеріалом для дослідження послужили листи комерційного титану марки 1 (0,04 % Fe; 0,015 % С; 0,05 % N; 0,005 % O; 0,09 % Н) в стані поставки після вальцювання та відпалу при 840° С товщиною 1 мм (вихідний лист). Вихідні листи розрізали на смуги розміром (100 × 100) мм. Далі смуги піддавали знакозмінному вигину на спеціально виготовленому пристрої за допомогою ролика діаметром 50 мм в напрямку вальцювання (НВ). Швидкість руху металу при вигині складала ~ 150 мм/с. З вихідного листа та листів після вигину на 0,5; 1 3 і 5 циклів вирізали по три партії зразків для механічних випробувань у НВ і поперечному напрямку (ПН), а також зразки для дослідження текстури. Для дослідження пружних властивостей з вихідних листів, а також листів після ЗВ вирізали прямокутні зразки довжиною 100 мм і шириною 10 мм у НВ і ПН. Модуль Юнга вимірювали динамічним методом за частотою власних згинальних коливань плоского зразка [9]. Похибка не перевищувала 1%. 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 НВ і ПН. Довжина і ширина робочої частини зразків складала 15 мм і 12,5 мм, відповідно. Як значення механічних властивостей брали усереднену величину по трьом партіям зразків в кожному напрямку.

Перед дослідженням текстури зразки хімічно полірували на глибину 0,1 мм для зняття спотвореного поверхневого шару. Кристалографічну текстуру досліджували з двох поверхонь зразків після зазначеного вище числа циклів за допомогою зйомки обернених полюсних фігур (ОПФ) в напрямку нормалі (НН) до площини вальцювання (НН ОПФ) і напрямку вальцювання (НВ ОПФ) на дифрактометрі ДРОН-3м у фільтрованому випромінюванні K_{α} -Мо. Еталонний зразок (бестекстурний) виготовили з дрібної рекристалізованої тирси досліджуваного титану. Для зйомки ОПФ НВ виготовляли складальні зразки.

Для характеристики накопичення пошкоджень використовують так званий параметр пошкоджуваності ω , який був запропонований ще в ранніх роботах Качанова [10], Работнова [11] і розвивається в наш час [12-14]. Параметр пошкоджуваності $0 \leq \omega \leq 1$ характеризує сукупність мікроструктурних змін в матеріалі, викликаних появою і накопиченням мікрodefektів при експлуатаційних навантаженнях. Параметр пошкоджуваності інтерпретується як відносне скорочення ефективної, несучої навантаження площі поперечного перерізу внаслідок накопичення пошкоджень. Деградація матеріалу пояснюється як поступове зменшення ефективної площі, яка реально несе розтяжне навантаження та визначає опірність зразка розтягу:

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

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

При такій інтерпретації параметр пошкоджуваності може бути отриманий зі зміни модуля пружності. Відповідно до гіпотези еквівалентної деформації [12], параметр пошкоджуваності ω може бути знайдений за співвідношенням:

$$\omega_1 = 1 - E/E_0, \quad (2)$$

де E_0 і E модулі пружності неушкодженого зразка і поточне значення модуля, відповідно.

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

$$\omega_2 = 1 - (E/E_0)^{1/2}. \quad (3)$$

Лише один компонент тензора в (3) не дорівнює нулю для одновісного розтягу [11]. Параметр пошкоджуваності ω може бути знайдений для одновісного розтягу зі зміни пружних характеристик, з огляду на представницький елемент об'єму ортотропної симетрії. Мається на увазі, що найбільш складна анізотропія, яка може бути розглянута, є ортотропною. Навіть при високій щільності взаємодіючих тріщин, ефективні пружні властивості залишалися ортотропними з хорошою точністю, як показав Качанов [10] шляхом мікромеханічного аналізу. У [15] було експериментально показано, що оцінка параметра пошкоджуваності на основі моделі еквівалентної деформації Леметра [12] дає більш високі значення параметра пошкоджуваності у порівнянні з моделями, заснованими на гіпотезі еквівалентної пружної енергії [13, 14], та які дають близькі числові значення. Тому оцінка параметра пошкоджуваності ω з (3) є кращою в порівнянні з (2) при аналізі анізотропії пошкоджуваності листового матеріалу [15].

II. Експериментальні результати й обговорення

Експериментальні ОПФ досліджуваного титану представлені на рис. 1.

У вихідному аркуші (рис. 1, а, б), сформувалася текстура, що представляє собою комбінацію текстури рекристалізації подвійного відхиленого в ПН базисного типу $\{11\bar{2}4\}\{11\bar{2}0\}$ з розсіюванням до $\{10\bar{1}4\}\{10\bar{1}0\}$, яка раніше була описана, зокрема, в [3, 4] і двійників відпаду. Видно, що всі досліджені листи титану мають текстуру подвійного базисного відхиленого в ПН типу. Однак кут відхилення і полюсна щільність змінюються в залежності від кількості циклів ЗІ (рис. 1). Спостерігаються зміни в характері розсіювання текстури (рис. 1, с-п). Змінюються також і значення полюсної щільності на ОПФ.

Для кількісної оцінки текстури гексагональних матеріалів часто використовуються коефіцієнти текстури Кернса [5-8]. Ці коефіцієнти, f_j (індекс j означає відповідний напрям в зразку НН, НВ або ПН), показують ступінь збігу c -осей кристалічної гексагональної комірки зерен із заданим геометричним напрямком в полікристалічному матеріалі і можуть бути знайдені з ОПФ за співвідношенням:

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

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 -того рефлексу на j -тій ОПФ до відповідного значення інтенсивності рефлексу зразка без текстури I_R ; I_R - статистичні ваги i -того рефлексу ($\sum A_i P_{ji} = 1$) [16].

Умовно A_i визначається часткою площі поверхні стереографічного трикутника навколо нормалі до i -того рефлексу відповідної ОПФ; α_i - кут відхилення від осі c i -того кристаллографічного напрямку для j -того напрямку в зразку.

Для гексагональних монокристалів величина певних властивостей монокристала $P(\varphi)$, що зв'язують дві векторні величини або тензор зі скалярною величиною, визначається [17] як:

$$P(\varphi)_{ref} = P_c \cos^2 \varphi + P_a (1 - \cos^2 \varphi), \quad (5)$$

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

У припущенні, що кристали в полікристалі вносять свій внесок в об'ємне властивість пропорційно їх об'ємній частці, V_i , внесок в об'ємну властивість кристалів, осі з яких орієнтовані під кутом нахилу φ до обраним напрямком, може бути записаний у вигляді:

$$P(\varphi_i)_{ref} = P_c V_i \cos^2 \varphi_i + P_a V_i (1 - \cos^2 \varphi_i). \quad (6)$$

Підсумовуючи по всьому об'єму, отримаємо:

$$P(\varphi_i)_{ref} = P_c \sum_i V_i \cos^2 \varphi_i + P_a \sum_i V_i (1 - \cos^2 \varphi_i). \quad (7)$$

Так як $\sum_i V_i = 1$, а $\sum_i V_i \cos^2 \varphi_i = f_j$ - текстурний параметр Кернса, то можна записати:

$$P(\varphi_i)_{ref} = f_j P_c + (1 - f_j) P_a. \quad (8)$$

Для знаходження текстурних параметрів Кернса ми використовували ОПФ на рис. 1, значення A_i , які були взяті з [18]. Для розрахунку значення кутів за відомими формулами [14] використовували відоме ставлення параметрів кристалічної решітки досліджуваного титану.

Кернс показав [8], що якщо властивість матеріалу можуть бути описані тензором (як, наприклад, пружність), то вони підкоряються співвідношенню

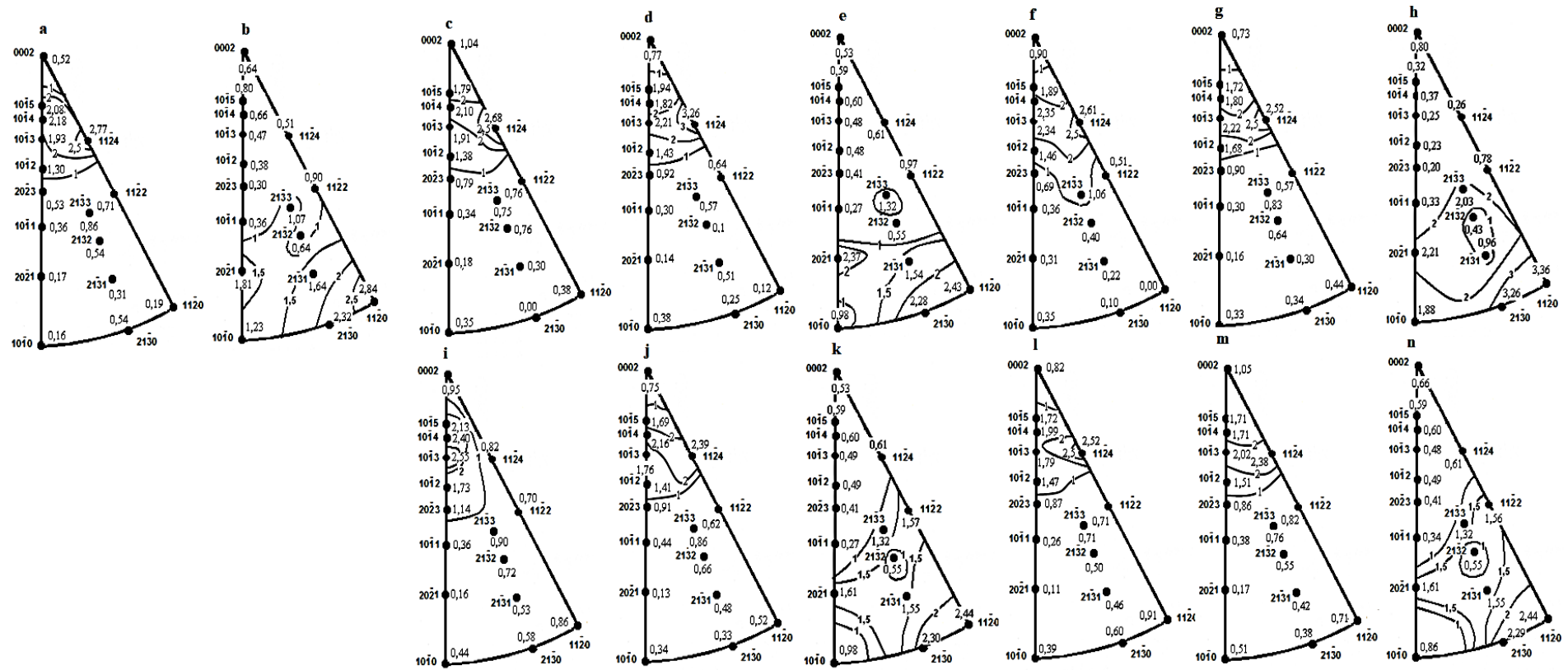


Рис. 1. Експериментальні обернені полюсні фігури титану: (а, б) – вихідний лист; листи після знакозмінного вигину на 0,5 (с - е); 1 - (f-h); 3 - (i-k); 5 - (l-n) циклів; (b, e, h, k, n) відповідає напрямку вальцювання (НВ); (а, с, d, f, g, i, j, l, m) відповідає нормальному напрямку (НН) до площини листа; (с, f, i, l) - розтягнута сторона листів; (d, g, j, m) - стиснута сторона листів.

Таблиця 1

Параметри текстури Кернса

Число циклів, n	Параметри текстури Кернса				
	$f_{ND}^{(1)}$	$f_{ND}^{(2)}$	$f_{ND}^{(av)}$	f_{RD}	f_{TD}
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

Таблиця 2

Розрахункові і експериментальні значення модуля пружності листів досліджуваного титану

Кількість циклів ЗВ	$E_{НН}^{розрах.}$, ГПа	$E_{НН}^{експ.}$, ГПа	$E_{НВ}^{розрах.}$, ГПа	$E_{НВ}^{експ.}$, ГПа	$\Delta E/E_{експ.}$, %	$E_{ПН}^{розрах.}$, ГПа	$E_{ПН}^{експ.}$, ГПа	$\Delta E/E_{експ.}$, %
0	117.383	-	106.316	107.6	1.19	104.301	104.8	-0.5
0.5	116.391	-	106.440	107.4	0.89	105.169	104.0	1.1
1.0	116.267	-	106.719	106.4	-0.30	105.014	103.6	1.7
3.0	115.058	-	106.688	106.0	-0.65	106.254	102.5	3.7
5.0	115.275	-	106.688	105.4	-1.22	106.037	103.0	3.0

(8). В цьому випадку, сума f_j в трьох основних напрямках листа повинна бути дорівнює одиниці, а значення 1/3 в кожному напрямку визначає ізотропний випадок. Таким чином, якщо відомі коефіцієнти текстури Кернса, знайдені з НН ОПФ ($f_{НН}$) і НВ ОПФ ($f_{НВ}$), то можна знайти коефіцієнт Кернса для третього напрямку в листі - поперечного напрямку (ПН) - $f_{ПН}$ зі співвідношення:

$$f_{НН} + f_{ПН} + f_{НВ} = 1. \quad (9)$$

Параметри текстури Кернса, розраховані з НН ОПФ ($f_{НН}$) і НВ ОПФ ($f_{НВ}$) з даних рис. 1, а також розраховані за співвідношенням (9), наведені в табл. 1.

Аналіз розподілу полюсної щільності на ОПФ протилежних сторін листів після різного числа циклів ЗВ показав певні невідповідності (рис. 1, с, d; f, g; i, j; l, m). Зазначені невідповідності в розподілі полюсної щільності на НН ОПФ після різного числа циклів ЗВ відбиваються на величині параметрів текстури Кернса, розрахованих з НН ОПФ протилежних сторін листів після ЗВ.

Причина такої невідповідності обумовлена тим, що при вигині в одну сторону шари металу на опуклій стороні листа піддаються деформації розтягом. У той же час відповідні шари металу на увігнутій стороні листа деформуються шляхом стиснення. При зміні знака вигину деформаційні процеси змінюються на протилежні. Подібні невідповідності в розподілі полюсної щільності на ОПФ зовнішньої і внутрішньої сторони смуг, отриманих після розрізу уздовж осі трубки зі сплаву Zr - 2,5 % Nb та випрямлення, були виявлені раніше в роботі [19]. Для подальшого аналізу впливу знакозмінного вигину на властивості досліджуваного

сплаву в напрямку НН ми використовували значення параметрів текстури Кернса $f_{НН}$, усереднені по обидва боки листів $f_{НН}^{(av)}$ після відповідного числа циклів ЗВ.

Значення модуля пружності листів досліджуваного титану, виміряні і розраховані в НН, НП і ПН по співвідношенням типу (8), представлені в табл. 2. При розрахунках використовували значення пружного модуля монокристалу титану, близького за хімічним складом до досліджуваному нами, взяті з роботи [20]: уздовж гексагональної осі c ($E_c = 130$ ГПа) і уздовж осі a ($E_a = 99$ ГПа).

Видно, що максимальне відхилення розрахункових і експериментальних значень модуля пружності не перевищує 5%. Виміряти модуль пружності в НН не вдалося внаслідок малої товщини листів (1 мм). Аналіз експериментальних значень модуля пружності листів показує, що зі збільшенням числа циклів ЗВ величина модуля пружності зменшується. Це обумовлено накопиченням мікроскопічних пошкоджень з ростом ступеня деформації (числа циклів ЗВ), що призводить до зменшення ефективної площі поперечного перерізу зразків і зростання коефіцієнта пошкоджуваності відповідно до співвідношенням (1) - (3).

Результати оцінки параметрів пошкоджуваності на основі гіпотези еквівалентної деформації [12] по співвідношенню (2), і на основі моделі еквівалентної пружної енергії [13] (3) представлені в табл. 3.

Як видно (табл. 3), величина ω_1 і ω_2 у ПН в процесі ЗВ більше, ніж їх значення в НВ листів. Крім того, з ростом числа циклів ЗВ до 5 величини ω_1 і ω_2 зразків досліджуваного титану в НП збільшуються, в той час як значення ω_1 і ω_2 у ПН листів збільшуються з ростом числа циклів ЗВ до 3, а після 5 циклів ЗВ зменшуються.

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта пошкоджуваності ω від числа циклів ЗВ

Кількість циклів ЗВ	$\omega_1 = 1 - E/E_0$,	$\omega_2 = 1 - (E/E_0)^{0.5}$,	$\omega_1 = 1 - E/E_0$,	$\omega_2 = 1 - (E/E_0)^{0.5}$,
	% НВ	% НВ	% ПН	% ПН
0	0	0	0	0
0.5	0.19	0.09	0.76	0.38
1.0	1.12	0.56	1.15	0.57
3.0	1.49	0.75	2.19	1.10
5.0	2.04	1.03	1.72	0.86

Оцінимо межі міцності σ_B і плинності $\sigma_{0,2}$ листів досліджуваного титану за даними для монокристала. З цією метою оцінимо спочатку величини меж міцності і плинності монокристалу титану досліджуваного титану вздовж осі c (відповідно σ_B^c і $\sigma_{0,2}^c$) й уздовж осі a (σ_B^a і $\sigma_{0,2}^a$). У літературі такі дані відсутні. Однак їх можна знайти, використовуючи дані по твердості з результатів наноіндентування. Ці результати значно відрізняються в залежності від чистоти титану. Так, для титану високої чистоти (йодидний титан, НР Ті, СР Ті (grade 1)) мінімальне значення твердості було виявлено при наноіндентування площині базису [21, 22]. У той же час в титані меншої чистоти, як, наприклад, в комерційному титані СР Ті (grade 2) базисна площина найтвердіша [23 - 25]. В роботі [22] представлені експериментальні результати вимірювання твердості по Віккерсу (H_V) уздовж гексагональної осі ($H_V^c = 1770$ МПа) і поперек неї ($H_V^a = 1220$ МПа) в монокристалах чистого титану, близького за хімічним складом до досліджуваного нами в даній роботі. Оцінку величин відповідних меж міцності σ_B і плинності $\sigma_{0,2}$ проведемо по емпіричним співвідношенням [26], які мають вигляд:

$$\sigma_B = \frac{H_V}{2.9} \cdot (1 - n) \cdot \left[\frac{12.5 \cdot n}{1 - n} \right]^n, \quad (10)$$

$$\sigma_{0,2} = \frac{H_V}{3} \cdot (0.1)^n, \quad (11)$$

де n - параметр зміцнення, рівний для титану 0,11 за даними роботи [26].

Використовуючи співвідношення (10) і (11), а також значення $H_V^c = 1770$ МПа і $H_V^a = 1220$ МПа, отримуємо:

$$\sigma_B^c = 374 \text{ МПа}, \sigma_{0,2}^c = 315 \text{ МПа} \quad (12)$$

$$\sigma_B^a = 356 \text{ МПа}, \sigma_{0,2}^a = 329 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Для оцінки меж міцності досліджуваного титану скористаємося співвідношеннями, аналогічними (8):

$$\sigma_B^{HN} = f_{HN} \cdot \sigma_B^c + (1 - f_{HN}) \cdot \sigma_B^a \quad (14)$$

$$\sigma_B^{PN} = f_{PN} \cdot \sigma_B^c + (1 - f_{PN}) \cdot \sigma_B^a \quad (15)$$

$$\sigma_B^{HN} = f_{HN} \cdot \sigma_B^c + (1 - f_{HN}) \cdot \sigma_B^a \quad (16).$$

Аналогічно для меж плинності отримуємо:

$$\sigma_{0,2}^{HN} = f_{HN} \cdot \sigma_{0,2}^c + (1 - f_{HN}) \cdot \sigma_{0,2}^a \quad (17)$$

$$\sigma_{0,2}^{PN} = f_{PN} \cdot \sigma_{0,2}^c + (1 - f_{PN}) \cdot \sigma_{0,2}^a \quad (18)$$

$$\sigma_{0,2}^{HN} = f_{HN} \cdot \sigma_{0,2}^c + (1 - f_{HN}) \cdot \sigma_{0,2}^a \quad (19)$$

Результати розрахунків і вимірювань меж міцності представлені в табл. 4.

Результати розрахунків і вимірювань меж плинності представлені в табл. 5.

Як видно з тал. 4, 5 максимальне відхилення вимірних в НН і ПН листів досліджуваного титану величин меж міцності і плинності і розрахованих за допомогою параметрів текстури Кернса, не перевищують 10 %. Виміряти вищезгадані характеристики міцності в НН листів досліджуваного титану не представляється можливим внаслідок їх малої товщини (1 мм).

Таблиця 4

Межі міцності σ_B , виміряні та розраховані з використанням параметрів текстури Кернса (табл. 1) і значень σ_B^c і σ_B^a монокристалла титану (12), (13)

Кількість циклів ЗВ	σ_B^{HN} расч., МПа	σ_B^{HN} експ., МПа	σ_B^{NV} расч., МПа	σ_B^{NV} експ., МПа	$\Delta\sigma/\sigma_{\text{експ.}}$, %	σ_B^{PN} расч., МПа	σ_B^{PN} експ., МПа	$\Delta\sigma/\sigma_{\text{експ.}}$, %
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

Межі плинності $\sigma_{0,2}$ Y, виміряні та розраховані з використанням параметрів текстури Кернса (Табл. 1) і значень $\sigma_{0,2}^c$ і $\sigma_{0,2}^a$ монокристалла титану (12), (13)

Кількість циклів ЗВ	$\sigma_{0,2}^{HH}$ расч, МПа	$\sigma_{0,2}^{HH}$ експ, МПа	$\sigma_{0,2}^{HB}$ расч, МПа	$\sigma_{0,2}^{HB}$ експ, МПа	$\Delta\sigma/\sigma_{експ.}$ %	$\sigma_{0,2}^{HH}$ расч, МПа	$\sigma_{0,2}^{HH}$ експ, МПа	$\Delta\sigma/\sigma_{експ.}$ %
0	320.	-	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

Висновки

Знайдено параметри текстури Кернса і проведена оцінка на їх основі модулів пружності, механічних властивостей при випробуваннях на одновісний розтяг (межа міцності, умовна межа плинності) листів титану марки 1 (0,04 % Fe; 0,015 % C; 0,05 % N; 0,005 % O; 0,09 % H) в стані поставки після прокатки і відпалу при 840 °C (вихідний лист) і подальшого знакозмінного вигину (ЗВ) в кількості 0.5; 1.0, 3.0 і 5.0 циклів.

Параметри текстури Кернса, які показують ступень збігу гексагональної осі кристалічної комірки зерен із заданим геометричним напрямком в полікристалічному зразку, розраховували з обернених полюсних фігур напрямку нормалі до площини листів и напрямку вальцювання.

Константи пружності монокристалу комерційного титану (СТ Grade 1) та розраховані параметри текстури Кернса були використані для оцінки модуля пружності в напрямку вальцювання, поперечному напрямку вихідного листа, а також листів після вищезазначеного вище числа циклів ЗВ. Розрахункові значення модуля пружності відхилялися від відповідних вимірних значень в межах 5 %.

Параметри пошкоджуваності, які характеризують накопичення пошкоджень, визначали зі зміни модуля пружності після зазначеного числа циклів знакозмінного вигину відносно значень модуля пружності в різних напрямках вихідного листа досліджуваного сплаву. Параметри пошкоджуваності розраховувалися з використанням моделей еквівалентної деформації і еквівалентної пружної енергії. Встановлено, що параметри пошкоджуваності в поперечному напрямку в процесі знакозмінного вигину більше, ніж в напрямку

вальцювання листів. Крім того, с ростом числа циклів знакозмінного вигину до 5 параметри пошкоджуваності зразків досліджуваного титану в напрямку вальцювання зростають, в той самий час параметри пошкоджуваності у поперечному напрямку листів зростають з ростом числа циклі знакозмінного вигину до трьох, а після п'яти циклі знакозмінного вигину зменшуються.

На підставі емпіричних співвідношень між твердістю і міцністю були знайдені значення межі міцності і межі плинності монокристалу титану уздовж його гексагональної осі і перпендикулярно їй. Значення межі міцності і межі плинності досліджуваних листів полікристалічного титану, як в початковому стані, так і після відповідної кількості циклів знакозмінного вигину оцінювалися в напрямку вальцювання та поперечному напрямку з використанням зазначених вище меж міцності і плинності монокристалу титану і параметрів текстури Кернса. Відхилення від відповідних експериментальних значень не перевищували 10 %.

Описані вище способи оцінки фізико-механічних властивостей полікристалів з гексагональною структурою можуть бути використані у тих випадках, коли вимір властивості у певному напрямку полікристалічного зразка зробити важко або неможливо. Наприклад, у напрямку нормалі до площини тонких листів, або після волочіння дроту, а також після гвинтової екструзії зразка перпендикулярно їх осі.

Усов В.В. - професор, д.ф.-м.н., професор кафедри технологічної та професійної освіти;

Шкатуляк Н.М. - к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри фізики;

Савчук О.С. - к.ф.-м.н., викладач кафедри фізики та хімії;

Рибак Н.І. - аспірантка кафедри фізики.

- [1] A. Khorev, Heat, thermo-mechanical treatment and textural hardening of welded titanium alloys; <https://www.viam.ru/public/files/2012/2012-206018.pdf> [in Russian].
- [2] Methods of leveling sheet metal; <https://blog.arku.com/us/methods-of-leveling-sheet-metal/>.
- [3] В. Усов, П. Брюханов, М. Родман, Н. Шкатуляк, М. Шапер, Х. Клозе, Ф.-В. Бах, Деформация и разрушение материалов 9, 33 (2012); http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=1692.
- [4] N. Shkatulyak, E. Savchuk, V. Usov, Journal of Materials Research and Technology 7(1), 82 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.007>.

- [5] J. Kearns, Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy; <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/WAPDTM472.xhtml>.
- [6] D. Dzunovich, S. Betsofen, and P. Panin, Russian Metallurgy (Metally) 10, 813 (2017); <https://doi.org/10.1134/S0036029517100056>.
- [7] V. Grytsyna, D. Malykhin, T. Yurkova et al., East Eur. J. Phys. 3, 38 (2019); <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2019-3-05>.
- [8] J. Kearns, 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] 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.
- [10] L.M. Kachanov, Fundamentals of fracture mechanics (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
- [11] Y.N. Rabotnov, Selected works. Problems of Solid Mechanics (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].
- [12] J. Lemaitre, R. Desmorat, Eur. J. Mech. A /Solids/ 19(2), 187 (2000); [https://doi.org/10.1016/s0997-7538\(00\)00161-3](https://doi.org/10.1016/s0997-7538(00)00161-3).
- [13] N. Hansen, H. Schreyer, Int. J. Solid. Structures 31(3), 359 (1994); [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)90112-0).
- [14] C. Chow, J. Wang, International Journal of Fracture 33(1), 3 (1987); <https://doi.org/10.1007/BF00034895>.
- [15] M. Bobyr, O. Khalimon, O. Bondarets, Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute» 67, 5 (2013); (http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2013_67_3).
- [16] P.R. Morris, Journal of Applied Physics 30(4) (1959); <https://doi.org/10.1063/1.1702413>.
- [17] J.F. Nye, Physical properties of crystals their representation. Their representation by tensors and matrices, (Oxford: University Press, 2006).
- [18] Ya.D. Vishnyakov, A.A. Babareko, S.A. Vladimirov, I.V. Egiz, The theory of texture formation in metals and alloys (Nauka, Moscow, 1979 [in Russian]).
- [19] V. Grytsyna, D. Malykhin, T. Yurkova et al., East. Eur. J. Phys. 3, 38 (2019); <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2019-3-05>.
- [20] J. Gong & A. Wilkinson, Philosophical Magazine Letters 90(7), 503 (2010); <https://doi.org/10.1080/09500831003772989>.
- [21] F.K. Mante, G.R. Baran, B. Lucas, Biomaterial 20, 1051 (1999); [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(98\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(98)00257-9).
- [22] S.V. Lubenets, A.V. Rusakova, L.S. Fomenko, and V.A. Moskalenko, Low Temp. Phys. 44(1), 73 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5020901>.
- [23] E. Merson, R. Brydson, and A. Brown, Journal of Physics, Conference Series 126, 012020 (2008); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/126/1/012020>.
- [24] C. Zambaldi, Y. Yang, T. R. Bieler, D. Raabe, J. Mater. Res., 27(1), 356 (2012); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/126/1/012020>.
- [25] M.W. Priddy, D.L. McDowell, S.R. Kalidindi, Acta Materialia 117, 23 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.053>.
- [26] F. Khodabakhshi, M. Haghshenas, H. Eskandari, B., Materials Science & Engineering A 636(11), 331 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.122>.

V. Usov¹, N. Shkatulyak¹, O. Savchuk², N. Rybak¹

Kearns Texture Parameters, Mechanical Properties and Damageability of Titanium Sheet after Alternating Bending

¹South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, Odessa, Ukraine, valentinusov67@gmail.com
²National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine, z9816@yandex.ua

This work aims to determine the Kearns texture parameters and evaluate on their basis the elastic moduli, mechanical properties (ultimate tensile strength, conditional yield stress), as well as damageability parameters of the sheets commercial titanium (CT-grade 1: 0.04 % Fe; 0.015 % C; 0.05 % N 0.05 % c; 0.009 % H) as delivered after rolling and annealing at 840 °C (original sheet) and further alternating bending (AB) in the amount of 0.5; 1, 3 and 5 cycles. Damageability parameters characterizing damage accumulation were determined from the elastic modulus change after the above-mentioned number of AB cycles relative to the values of the elastic modulus in different directions of the original sheet of the studied titanium. The elastic constants of the single crystal and the Kearns texture parameters were used to estimate the elastic modulus in the rolling direction (RD) and transverse direction (TD) of the original sheet, and sheets after an above number of AB cycles. The deviation of the calculated and experimental values of the elastic modulus did not exceed 5 %. The deviation of the calculated and experimental values of the ultimate tensile strength and yield stress in the RD and TD both in the initial state and after the corresponding number cycles of the AB did not exceed 10 %.

Keywords: Kearns texture parameters, elastic modulus, ultimate tensile strength, conditional yield stress, damageability.