

УДК 669.295:669–176  
PACS number(s): 91.60.Dc

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОРІЄНТАЦІЙНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА УШКОДЖЕНЬ ПРОКАТАНИХ ЛИСТІВ ТЕХНІЧНОГО ТИТАНУ VT1-0

**Н. Волчок, О. Гохман**

*Південноукраїнський державний педагогічний університет  
імені К.Д. Ушинського,  
вул. Старопортофранківська, 26, 65020 Одеса, Україна  
e-mail: nata.volchok@rambler.ru*

Вивчали анізотропію коефіцієнта ушкодження текстурованих листів  $\alpha$ -титана для різних напруг за результатами вимірів динамічного і статичного модулів Юнга. Найкращий збіг з експериментальною анізотропією дає представлення коефіцієнта ушкодження тензором шостого рангу, задовільний збіг – другого рангу. За даними текстурного аналізу листів і анізотропії коефіцієнта ушкодження в наближенні другої тензорної розмірності розраховані монокристалні характеристики коефіцієнта ушкодження титану VT1–0 у відпаленому стані і знайдені значення його в нормальному до листа напрямі.

*Ключові слова:* диференціальний модуль Юнга, текстура, коефіцієнт ушкодження, тензор.

Ушкодження матеріалу зумовлене формуванням і розвитком у його обсязі тріщин і порожнеч. Кількісний параметр ушкодження ( $D$ ) визначають як відношення площі поперечного перерізу зразка, зайнятого дефектами до загальної його площі. Інакше кажучи, величину  $D$  мають розраховувати за результатами фрактографічних досліджень. Однак трудомісткість таких методів стимулювала розвиток непрямих методів визначення коефіцієнта ушкодження за даними зміни диференціального модуля Юнга ( $E_d$ ), питомого електроопору, межі текучості й ін. [1]. Ці методи засновані на вимірі змін фізичних і механічних властивостей, зумовлених ушкодженням матеріалу.

Дослідження змін диференціального модуля Юнга дає найкращу точність у визначенні величини  $D$  як для відпалених, так і для деформованих матеріалів [1].

Модуль Юнга є зворотним компонентом тензора піддатливості  $S_{1111}$  [2], що залежить від напрямку виміру в текстурованих об'єктах. Тому у випадку гексагональних титанових сплавів, що володіють високою монокристалною анізотропією пружних властивостей [3], варто очікувати значної орієнтаційної залежності і коефіцієнта ушкодження.

Метою роботи є вивчення анізотропії коефіцієнта ушкодження у відпалених і деформованих листах технічного титану VT1–0.

Листи титану, в умовах постачання (вакуумний відпал), піддавали холодному прокатуванню на лабораторному стані до 20 і 40% обтиснення по товщині, без реверса, малими (не більш 5%) деформаціями за один прохід.

З кожного листа електроіскровим методом вирізували прямокутні зразки під різними кутами до напрямку прокатчування (НП) через кожні  $15^\circ$ .

Модуль Юнга визначали динамічним методом за частотою власних поперечних коливань зразка [4] і статичним методом [5].

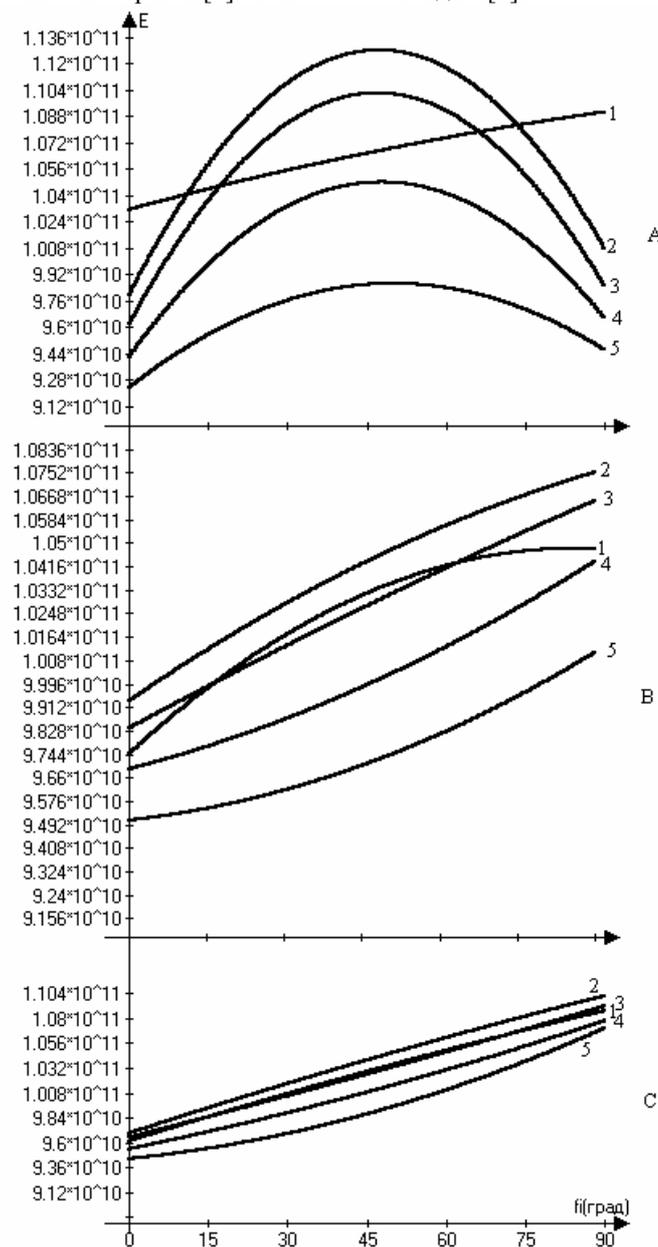


Рис. 1. Анізотропія динамічного (1) і диференційного модулів Юнга листів титана BT1-0 у вихідному стані (а) і деформованих до 20 (б) і 40% (с) деформації для напруг  $(2, 5, 10, 15) \cdot 10^7$  Па (2-5)

Текстуру вивчали методом прямих полюсних фігур (ПФ) на дифрактометрі ДРЗП-3 для площини (0002) [6]. За результатами кількісних полюсних фігур розраховували інтегральні характеристики текстури ( $I_i$ ) [7], перші три з яких становили:

для вихідних листів  $I_1=0,194173, I_2=0,265548, I_3=0,54027$ ; деформованих до  
20  $I_1=0,2303865, I_2=0,295473, I_3=0,474140$ ;  
40% обтиснення  $I_1=0,1996515, I_2=0,247786, I_3=0,552562$ .

Диференціальні модулі Юнга знаходили для напруг  $\sigma=(2, 5, 10 \text{ і } 15)*10^7$  Па. На рис. 1 показано залежності динамічного і диференціального модулів Юнга від напрямку у вихідних і деформованих листах титана.

Зі збільшенням напруги характер анізотропії диференціального модуля Юнга змінюється, що свідчить про орієнтаційний перерозподіл дефектів.

Залежність диференціальних модулів Юнга від напруги для всіх листів задовільно описують квадратичною залежністю

$$\sigma = a + bE_D + cE_D^2, \quad (1)$$

де  $a, b, c$  – параметри, що визначили методом найменших квадратів.

Інтерполяція до  $\sigma=0$  свідчить, що значення диференціальних модулів ( $E_0$ ) для всіх напрямів близькі до таких, що отримані динамічним методом для ненавантажених зразків.

Коефіцієнти ушкодження розраховували по формулі [1]:

$$D = \left( 1 - \frac{E_D}{E_0} \right). \quad (2)$$

Анізотропію коефіцієнта ушкодження подано у вигляді рядів Фур'є, коефіцієнти якого розраховували методом найменших квадратів у моделі ортотропного квазімонокристала [8]. На рис. 2 показано результати щодо анізотропії коефіцієнта ушкодження для вихідних і деформованих листів  $\alpha$ -титана для одного з навантажень  $\sigma = 10*10^7$  Па.

Найкраще наближення до експерименту дає представлення анізотропії  $D$  шістьма гармоніками ряду. Задовільний результат дає опис за допомогою двох парних гармонік. Збільшення числа гармонік до восьми не вносить суттєвої зміни в результати. Тому можна вважати, що коефіцієнт ушкодження досліджених листів із задовільною точністю може бути описаний тензором другого рангу. Тоді, на підставі [9], анізотропія ортотропного полікристала може бути подано у вигляді:

$$D(\varphi) = D_1^T + (D_1^T - D_2^T) \cos^2 \varphi,$$

де  $D_1^T = d_1^M + (d_2^M - d_1^M)I_1$ ;  $D_2^T = d_2^M + (d_2^M - d_1^M)I_2$ ;  $d_1^M, d_2^M$  – компоненти тензора коефіцієнта ушкодження монокристала,  $I_i$  – інтегральні характеристики текстури;  $D_1^T = D(0^\circ)$ ,  $D_2^T = D(90^\circ)$ .

Компоненти  $d_i$  розраховували для вихідних листів, які для напруги  $10*10^7$  Па становили:  $d_1^M = 0,05232$ ;  $d_2^M = 0,100286$ .

Згодом як і в [10] визначили значення коефіцієнта ушкодження для нормального до площини листа напрямку (НН).

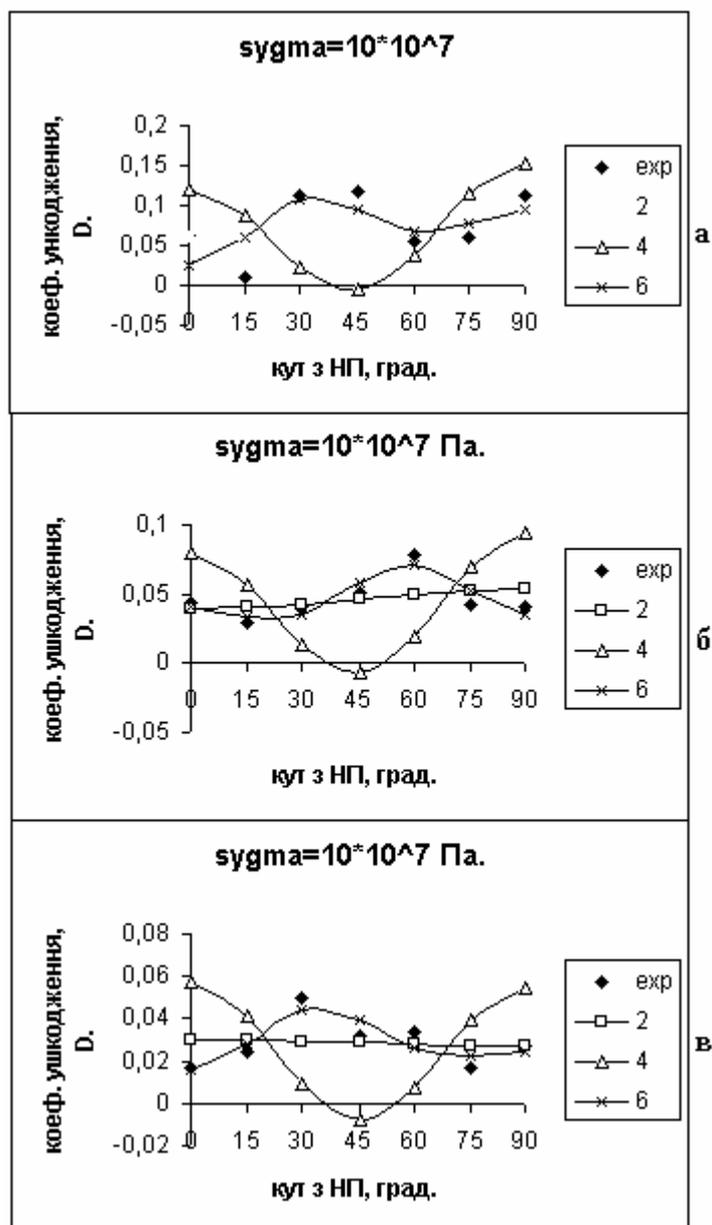


Рис. 2. Анізотропія коефіцієнта ушкодження а) – вихідних листів титана і деформованих холодною прокаткою до б) – 20 і в) – 40% обтиснення і подання її у вигляді рядів Фур'є з □ – 2, △ – 4, × – шістьма гармоніками:  $D_{HH}^T = d_1^M + (d_1^M - d_2^M)I_3$ , що дало результати при тих же умовах  $= 0,026415$ .

Відпалені і деформовані холодною прокаткою листи титана ВТ1-0 мають суттєву анізотропію коефіцієнта ушкодження. Тензор шостого рангу забезпечує найкращий опис орієнтаційної залежності коефіцієнта ушкодження відпалених і деформованих листів  $\alpha$ -титана. Показано, що використання тензора другого рангу незначно погіршує збіг розрахункових і експериментальних значень коефіцієнта ушкодження. Запропоновано метод розрахунку коефіцієнта ушкодження в нормальному напрямі до площини листового текстурованого полікристала, що використовує значення інтегральних характеристик текстури й опису коефіцієнта ушкодження як властивість кристала другої тензорної розмірності.

1. Брюханов А.О. Вивчення пружних властивостей сталевих дротів в області рекристалізації // УФЖ. 1965. Т. 10. № 1. С. 104–107.
2. Брюханов А.А., Гохман А.Р. Функция распределения ориентаций гексагонального  $\alpha$ -титана // Известия АН СССР. Металлы. 1985. № 5. С. 145–148.
3. Брюханов А.А., Гохман А.Р., Михайлевский Ю.Г., Цмоць В.М. Влияние пластической деформации на текстуру и свойства моно- и поликристаллов сплава ПТ-3Вкт // ФММ. 1991. Т. 56. № 5. С. 175–186.
4. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. М.: Металлургия, 1969. 654 с.
5. Вишняков Я.Д., Бабарэко А.А. и др. Теория образования текстур в металлах и сплавах. М.: Наука, 1969. 341 с.
6. Войтенко А.Ф., Скрипник Ю.Д., Соловьева Н.Г., Надеждина Г.Н. Влияние уровня напряжений на статический модуль Юнга ряда конструкционных материалов // Проблемы прочности. 1982. № 11. С. 83–87.
7. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: ИЛ. 1960. 385 с.
8. Цвиккер. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 510 с.
9. Gokhman A. On-line X-ray control of textured material characteristics, International Union of crystallography congress, Glasgow, England. 1999. 4-13. August. 1999.
10. Lemaitre J. A. course on damage Mechanics. Berlin: Springer, 1996. 228 p.

**THE INVESTIGATION OF THE DAMAGE COEFFICIENT DEPENDENCE OF ROLLED SHEETS OF TECHNICAL TITANIUM****N. Volchok, A. Gokhman**

*K. Ushynsky South Ukrainian State Pedagogical University, Physics Department  
Staroportofrankovskaya Str., 26, UA – 65020 Odessa, Ukraine  
e-mail: nata.volchok@rambler.ru*

The anisotropy of damage coefficient of textured  $\alpha$ -titanium sheets for different stresses was investigated. The results of measurements of dynamic and static Young's modulus were used for that. The best coincidence with experimental anisotropy provides representation of damage coefficient by a tensor of 6 and satisfactory coincidence – of 2 rank. On the texture analysis data of sheets and the anisotropies of damage coefficient in approximation of the second tensor dimension were calculated the monocrystals characteristics of damage coefficient of  $\alpha$ -titanium in an annealed state.

The value of damage coefficient in normal to sheets directions was calculated.

*Key words:* a differential Young's modulus, texture, damage coefficient, tensor.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2004

Прийнята до друку 21.11.2005