

PACS: 81.40.E, 77.84.D, 62.20.F

А.Р. Гохман, Н.А. Волчок

## ИЗУЧЕНИЕ ОРИЕНТАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПРОКАТАННЫХ ЛИСТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА VT1-0

Южноукраинский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского  
ул. Старопортофранковская, 26, г. Одесса, 65020, Украина  
E-mail: nata.volchok@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2009 года

*Изучена анизотропия коэффициента повреждаемости текстурованных листов  $\alpha$ -титана для различных напряжений по результатам измерений динамического и статического модулей Юнга. Наилучшее совпадение с экспериментальной анизотропией дает представление коэффициента повреждаемости тензором 6-го ранга, удовлетворительное совпадение – тензором 2-го ранга. По данным текстурного анализа листов и анизотропии коэффициента повреждаемости в приближении второй тензорной размерности рассчитаны монокристалльные характеристики коэффициента повреждаемости титана VT1-0 в отожденном состоянии и найдено значение его в нормальном к листу направлении.*

**Ключевые слова:** коэффициент повреждаемости, титан, дифференциальный модуль Юнга, текстура, анизотропия, тензор

Повреждаемость материала обусловлена формированием и развитием в его объеме трещин и пустот. Количественный параметр повреждаемости  $D$  определяется как отношение площади поперечного сечения образца, заполненного дефектами, к его общей площади. Строго говоря, величина  $D$  должна рассчитываться по результатам фрактографических исследований. Трудоемкость таких методов стимулировала развитие непрямых методов определения коэффициента повреждаемости по данным изменения дифференциального модуля Юнга  $E_D$ , удельного электросопротивления, границ текучести и др. [1]. Эти методы основаны на измерении изменений физических и механических свойств, обусловленных повреждаемостью материала. Изучение изменений дифференциального модуля Юнга дает наилучшую точность в определении величины  $D$  как отожденных, так и деформированных материалов [1].

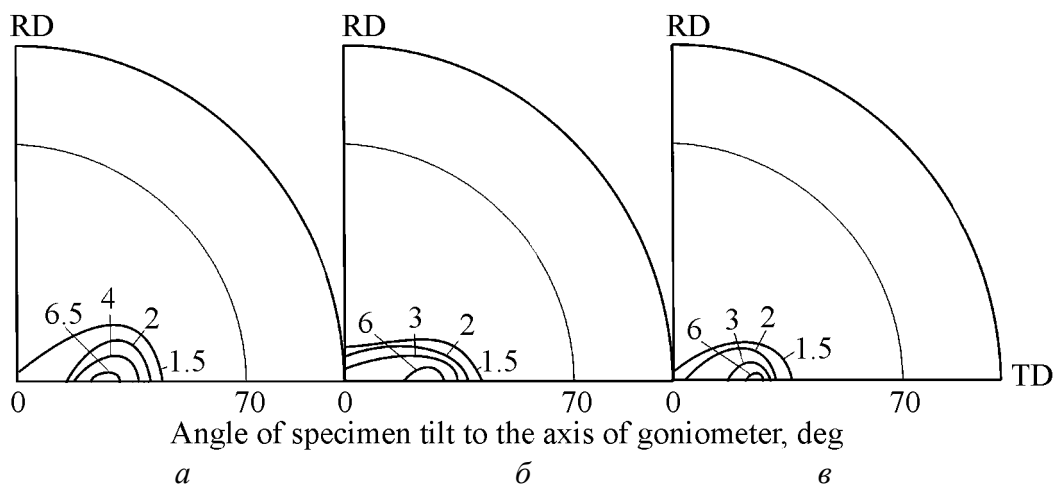
Модуль Юнга является обратной величиной компоненты тензора податливости  $s_{1111}$  [2], которая зависит от направления измерения в текстурованных объектах. Поэтому в случае гексагональных титановых сплавов, которые обладают

высокой монокристалльной анизотропией упругих свойств [3], следует ожидать и значительной ориентационной зависимости коэффициента повреждаемости.

Целью работы явилось изучение анизотропии коэффициента повреждаемости в отожженных и деформированных листах технического титана ВТ1-0.

Листы титана в условиях поставки (вакуумный отжиг) прокатывали при комнатной температуре до 20 и 40% обжатия по толщине на стане с диаметром валков 150 mm без реверса, малыми (не больше 5%) за один проход обжатиями. Для рентгенодифрактометрических исследований из каждого листа, включая исходный, вырезали дискообразные и прямоугольные образцы под различными к направлению прокатки углами (через каждые 15°).

Кривые полюсной плотности снимали в  $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении для плоскости (0002) на дифрактометре ДРОН-3М «на отражение» по методу Шульца [4]. По данным съемки строили прямые полюсные фигуры для углов наклона образца к оси гониометра 0–70°. Периферийная область таких фигур для титана не была заполнена, поэтому ее обнуляли. Представленные на рис. 1 экспериментальные полюсные фигуры имеют вид, типичный для гексагональных металлов с межосевым отношением  $c/a$  меньше идеального [4]. Отличия носят только количественный характер.



**Рис. 1.** Полюсные фигуры 1–6 для плоскости (0002) листов титана ВТ1-0 после вакуумного отжига (а) и последующей холодной прокатки до 20 (б) и 40% (в) обжатия; RD – направление прокатки, TD – поперечное направление

Так как плоскость (0001) в гексагональном кристалле изотропна в отношении тензорных свойств [5], для расчета анизотропии последних достаточно знать распределение нормали [0001] на сфере проекций. При оценке анизотропии тензорных свойств можно использовать так называемые интегральные характеристики текстуры (ИХТ), которые представляют собой усреднения комбинаций направляющих косинусов нормали [0001] по отношению к системе координат образца [6]. ИХТ могут быть рассчитаны из кривых полюсной плотности для плоскости (0002) путем усреднения направле-

ния нормали к изотропной плоскости кристалла по функции  $P_{(0002)}(\alpha, \beta)$  [6]. Для гексагонально-орторомбических поликристаллов (текстурованные листы) количество независимых ИХТ равно пяти, а модуль Юнга в произвольном направлении в плоскости текстурованного листа составляет

$$E^{-1}(\varphi) s_{11} + 2 \left( s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2} s_{44} \right) \Psi_2^T(\varphi) + (s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}) \Psi_4^T(\varphi),$$

где  $\Psi_2^T(\varphi) = I_1 \cos^4 \varphi + I_2 \sin^4 \varphi + \frac{1}{4} (I_1 + I_2) \sin^2 2\varphi$ ;  $\Psi_4^T(\varphi) = I_6 \cos^4 \varphi + I_4 \sin^4 \varphi + 1.5 I_5 \sin^2 2\varphi$ ;  $I_i = \frac{1}{4\pi\Omega} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \alpha_{i3}^n(\alpha, \beta) P_{(0002)}(\alpha, \beta) \sin \alpha d\alpha d\beta$  – ИХТ;  $\Omega = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} P_{(0002)}(\alpha, \beta) \sin \alpha d\alpha d\beta$  обеспечивает нормировку полюсной плотности в уровнях средней полюсной плотности;  $s_{ik}$  – компоненты тензора податливости монокристалла;  $P_{(0002)}(\alpha, \beta)$  – полюсная плотность, угол  $\varphi$  отсчитывается от направления прокатки;  $\alpha_{i3}$  – косинусы направления [0001] в сферических координатах.

В нашем случае первые три ИХТ составили

для исходных листов:  $I_1 = 0.13417$ ,  $I_2 = 0.41262$ ,  $I_3 = 0.45321$ ;

для деформированных листов

до 20% обжатия:  $I_1 = 0.16038$ ,  $I_2 = 0.35951$ ,  $I_3 = 0.48010$ ;

до 40%:  $I_1 = 0.22443$ ,  $I_2 = 0.45679$ ,  $I_3 = 0.41083$ .

Первые и третьи ИХТ растут, вторая – вначале падает, а затем растет. Такое поведение ИХТ согласуется с данными [6].

После вакуумного отжига листы рекристаллизовались и текстура была достаточно острой, базисного типа с отклонением гексагональной оси в поперечном направлении. Начальные стадии прокатки привели к рассеянию текстуры, что отразилось на значениях ИХТ. В дальнейшем количество активных систем деформации уменьшилось и текстура стала несколько острее.

Текстуру гексагонально-орторомбических поликристаллов часто описывают углом наклона  $\alpha$  гексагональной призмы к плоскости листа. Угол  $\alpha$  легко найти из выражения  $\sin^2 \alpha = I_2^{(h)} - I_1^{(h)}$ .

Таким образом, для описания анизотропии свойств второй тензорной размерности достаточно первых двух ИХТ:

$$e(\varphi) = e_1^{(M)} + \left( e_3^{(M)} - e_1^{(M)} \right) I_2^{(h)} + \left( e_3^{(M)} - e_1^{(M)} \right) \left( I_1^{(h)} - I_2^{(h)} \right) \cos^2 \varphi,$$

где  $e_i^{(M)}$  – монокристалльные характеристики свойства второй тензорной размерности в плоскости (0001) и направлении оси  $c$ .

Угол  $\alpha$  в плоскости НН–ПН (где НН – нормальное к плоскости листа направление, ПН – поперечное направление в плоскости листа) в рекристаллизованных листах составил 32°. После прокатки до 20% угол  $\alpha$  призмы уменьшил-

ся до 26°, а затем вырос до 28°. Такое изменение углов наклона гексагональной призмы объяснимо с точки зрения классического механизма пластической деформации гексагональных кристаллов [4]. Эти углы не описывают полностью текстуру и являются в определенном смысле эффективными, поскольку в текстуре присутствуют и другие ориентировки. Однако они позволяют оценить реальную анизотропию свойств второй и четвертой тензорных размерностей.

Плоские прямоугольные образцы использовали для определения динамического и дифференциальных модулей Юнга (рис. 2). Динамический модуль Юнга определяли по частоте собственных поперечных колебаний образца [7]. Анизотропия динамического модуля Юнга носит типичный для ГПУ-металлов и сплавов характер с межосевым соотношением  $c/d$  меньше идеального [8].

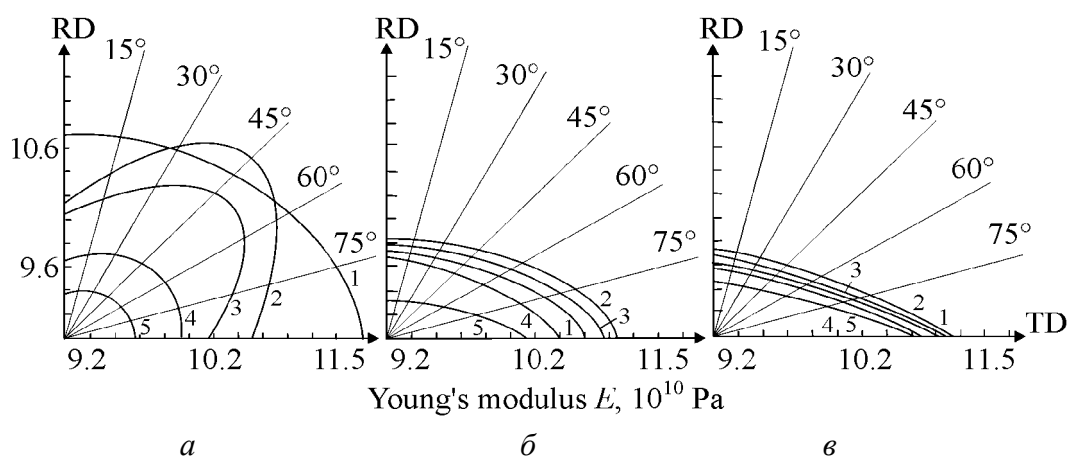


Рис. 2. Анизотропия динамического (1) и дифференциальных (2–5) модулей Юнга листов титана VT1-0 в исходном состоянии (а) и деформированных холодной прокаткой до 20 (б) и 40% (в) для напряжений, Па: 2 – 2; 3 – 5; 4 – 10; 5 – 15

Анизотропию статических модулей Юнга определяли из кривых испытаний плоских образцов «на изгиб» по методу [9]. Образец, помещенный на две призмы, нагружали в средней части и измеряли стрелу прогиба. Напряжение находили по формуле  $\sigma = \frac{3Pl}{2bd}$ , а деформацию – по формуле  $\varepsilon = \frac{6df}{l^2}$ , где  $P$  – нагрузка,  $l$  – расстояние между опорами,  $f$  – стрела прогиба образца,  $b$  и  $d$  – ширина и толщина образца соответственно. В точках, соответствующих напряжениям  $\sigma = (2, 5, 10, 15) \cdot 10^7$  Па, проводили касательные к кривым и рассчитывали модуль Юнга обычным способом как  $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$ . Учитывая склонность титана к ползучести при комнатных температурах [3], измерения проводили через одинаковые промежутки времени (30 s) после нагружения.

Дифференциальные модули Юнга находили из кривых изгиба под нагрузками, соответствующими различным напряжениям:  $\sigma = (2, 5, 10, 15) \cdot 10^7$  Па (рис. 2). После нагружения  $\sigma = 2 \cdot 10^7$  Па характер анизотропии дифференциального модуля Юнга меняется, что свидетельствует об ориентационном перераспределении дефектов.

Зависимость дифференциальных модулей Юнга от напряжения для всех листов удовлетворительно описывается следующей зависимостью:

$$E_D = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c(a - c)}}{2c},$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры, найденные методом наименьших квадратов.

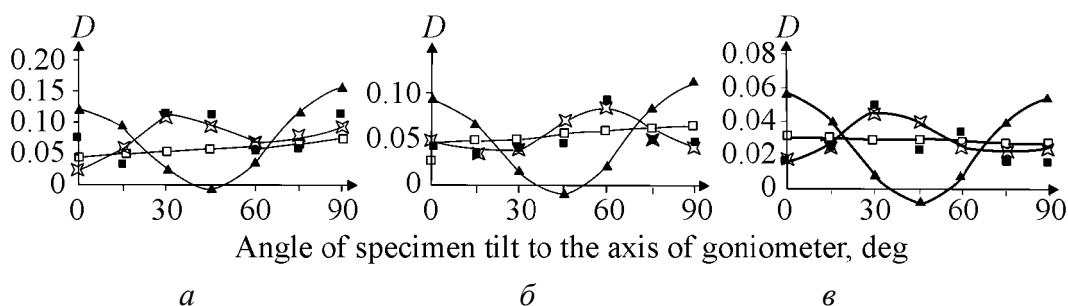
Интерполяция к  $\sigma = 0$  показала, что значения дифференциальных модулей  $E_0$  для всех направлений близки к таковым, полученным динамическим методом для ненагруженных образцов.

Коэффициенты повреждаемости  $D$  рассчитывали по формуле [1]:

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

Для всех листов получили значительную анизотропию коэффициента повреждаемости  $D$ , который в зависимости от обработки менялся в пределах от 0.5 до 0.78.

Анизотропию  $D$  представляли в виде ряда Фурье с коэффициентами, рассчитанными методом наименьших квадратов в модели ортотропного квази-монокристалла [8]. На рис. 3 приведены результаты разложения анизотропии коэффициента повреждаемости для исходных и деформированных листов  $\alpha$ -титана для нагрузки, соответствующей напряжению  $\sigma = 10 \cdot 10^7$  Па.



**Рис. 3.** Анизотропия коэффициента повреждаемости листов  $\alpha$ -титана в исходном состоянии (*a*) и деформированных холодной прокаткой до 20 (*б*) и 40% (*в*) в представлении ее в виде рядов Фурье с различным количеством гармоник:  $\square$  – 2,  $\blacktriangle$  – 4,  $\boxtimes$  – 6;  $\blacksquare$  – экспериментальные точки

Наилучшее приближение к эксперименту дает представление анизотропии  $D$  шестью гармониками ряда. Удовлетворительный результат получается при описании с помощью двух четных гармоник. Увеличение числа гармоник до восьми не вносит существенного изменения в результаты. Поэтому можно считать, что коэффициент повреждаемости исследованных листов с удовлетворительной точностью может быть описан тензором второго ранга. Тогда на основании [10] анизотропия ортотропного поликристалла может быть представлена в виде [8]:

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

где  $D_1^{(T)} = d_1^{(M)} + (d_2^{(M)} - d_1^{(M)}) I_1^{(h)}$ ;  $D_2^{(T)} = d_2^{(M)} + (d_2^{(M)} - d_1^{(M)}) I_2^{(h)}$ ;  $d_1^{(M)}$ ,  $d_2^{(M)}$  – компоненты тензора коэффициента повреждаемости монокристалла,  $I_i^{(h)}$  – интегральные характеристики;  $D_1^{(T)} = D(0^\circ)$ ,  $D_2^{(T)} = D(90^\circ)$ .

Компоненты  $d_i^{(M)}$  рассчитали для исходных листов, которые составили 0.015 и 0.079. Затем аналогично [11] определили значение коэффициента повреждаемости для НН  $D_{\text{НН}}^{(T)} = d_1^{(M)} + (d_2^{(M)} - d_1^{(M)}) I_3^{(h)}$ , которое для напряжения  $\sigma = 10 \cdot 10^7$  Па составило 0.04382.

### Выводы

1. Предложен метод расчета коэффициента повреждаемости в нормальном направлении к плоскости листового текстурованного поликристалла, в котором используются интегральные характеристики текстуры и описание анизотропии коэффициента повреждаемости как свойства кристалла второй тензорной размерности.

2. Отожженные и деформированные холодной прокаткой листы титана ВТ1-0 обладают существенной анизотропией коэффициента повреждаемости.

3. Тензор 6-го ранга обеспечивает наилучшее описание ориентационной зависимости коэффициента повреждаемости отожженных и деформированных листов  $\alpha$ -титана. Показано, что использование тензора 2-го ранга незначительно ухудшает совпадение расчетных и экспериментальных значений коэффициента повреждаемости.

1. *J. Lemaitre*, A course on damage mechanics, Springer, Berlin (1996).
2. *Дж. Най*, Физические свойства кристаллов, Изд-во иностр. лит., Москва (1960).
3. *Цвиккер*, Титан и его сплавы, Металлургия, Москва (1979).
4. *Г. Вассерман, И. Гревен*, Текстуры металлических материалов, Металлургия, Москва (1969).
5. *А.А. Брюханов*, Изв. вузов. Физика № 4, 153 (1974).
6. *А.А. Брюханов, А.Р. Гохман*, Изв. АН СССР, Металлы № 5, 145 (1985).
7. *А.О. Брюханов*, УФЖ **10**, № 1, 104 (1965).
8. *Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко и др.*, Теория образования текстур в металлах и сплавах, Наука, Москва (1969).
9. *А.Ф. Войтенко, Ю.Д. Скрипник, Н.Г. Соловьева, Г.Н. Надеждин*, Проблемы прочности № 11, 83 (1982).
10. *А.А. Брюханов, А.Р. Гохман, Ю.Г. Михайливский, В.М. Цмоць*, ФММ № 5, 175 (1991).
11. *A. Gokhman*, International Union of crystallography congress, 4–13 August, Glasgow, England (1999).

*О.Р. Гохман, Н.А. Волчок*

## ВИВЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЙНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТУ УШКОДЖЕННЯ ПРОКАТАНИХ ЛИСТІВ ТЕХНІЧНОГО ТИТАНУ BT1-0

Вивчено 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 6-го рангу, задовільний збіг – тензором 2-го рангу. За даними текстурного аналізу листів і анізотропії коефіцієнта ушкодження в наближенні другої тензорної розмірності розраховано монокристалні характеристики коефіцієнта ушкодження титана BT1-0 у відпаленому стані і знайдено значення його в нормальному до листа напрямку.

**Ключові слова:** коефіцієнт ушкодження, титан, диференційний модуль Юнга, текстура, анізотропія, тензор

*A.R. Gokhman, N.A. Volchok*

## STUDY OF THE ORIENTATION DEPENDENCE FOR DAMAGE COEFFICIENT OF COMMERCIAL TITANIUM BT1-0 ROLLED SHEETS

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

**Keywords:** damage coefficient, titanium, a differential Young's modulus, texture, anisotropy, tensor

**Fig. 1.** Pole figures 1–6 for the (0002) plane of titanium BT1-0 sheets after vacuum annealing (a) and subsequent cold rolling to 20 (b) and 40% (c) reduction; RD – rolling direction, TD – transverse direction

**Fig. 2.** Anisotropy of the dynamic (1) and differential (2–5) Young's moduli for titanium BT1-0 sheets in initial state (a) and deformed by cold rolling to 20 (b) and 40% (c) for stresses, Pa: 2 – 2; 3 – 5; 4 – 10; 5 – 15

**Fig. 3.** Anisotropy of damage coefficient for sheets of  $\alpha$ -titanium in initial state (a) and deformed by cold rolling to 20 (b) and 40% (c) as represented in the form of Fourier series with different quantity of harmonics:  $\square$  – 2,  $\blacktriangle$  – 4,  $\star$  – 6;  $\blacksquare$  – experimental points