

УДК 669..034.2  
PACS number(s): 61.66.B:81.40.E

## ІНТЕГРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕКСАГОНАЛЬНИХ ТЕКСТУР

**С. Іовчев, П. Стоянов, Н. Волчок**

*Південноукраїнський державний педагогічний університет  
імені К. Д. Ушинського  
вул Старопортофранковська, 26, 65020 Одеса, Україна  
e-mail: iovchev-serj@rambler.ru*

Вивчали текстуру листів гексагональних металів з різними міжосьовими співвідношеннями прокатаних до високих ступенів обтискання. Інтегральні характеристики текстури розраховували в моделі орторомбічного квазі-полікристала з прямих полюсних фігур (0002). Типом текстури визначається співвідношення між інтегральними характеристиками. Розраховані значення модуля Юнга в нормальному до листа напрямі.

*Ключові слова:* гексагональні метали, полюсна фігура, інтегральні характеристики, текстура.

Текстура, як важлива структурна складова супроводжує майже всі етапи виробництва і обробки металопродукції і відповідає за анізотропію властивостей металевих напівфабрикатів і готових виробів. Текстура несе важливу інформацію про механізми пластичної деформації, що реалізуються, рекристалізацію, фазові перетворення. Текстура може грати негативну роль, як причина утворення фестонів при штампуванні і глибокому витягу, а може слугувати додатковим резервом поліпшення властивостей металопродукції за міцнісними, габаритними, ваговими та іншими характеристиками.

Сучасні дифракційні методи вивчення текстур описують їх за допомогою ідеальних орієнтувань (ІО), якими моделюють безперервний розподіл кристалів за орієнтаціями [1, 2]. Такий підхід обмежує можливості прогнозування анізотропії властивостей, оскільки потребує, можливо, більшого числа ІО, що не завжди можливо.

Якнайповніше текстура може бути описана за допомогою функцій розподілу кристалів за орієнтаціями (ФРО) [3]. Відновлення ФРО з експериментальних полюсних фігур, потребує мінімум три повних полюсні фігури (ПФ) [4]. Крім того, ФРО несе з практичного погляду надлишкову інформацію і тому для прогнозування анізотропії властивостей ФРО згортають до необхідного обсягу [5]. Тут було показано, що достатньо повну інформацію про анізотропію властивостей несуть певні згортки ФРО, які автори назвали інтегральними характеристиками текстури (ІХТ) і які є комбінаціями направляючих косинусів системи координат кристала відносно системи координат зразка. Кількість ІХТ обмежена трьома для кубічних полікристалів і п'ятьма – для гексагональних. Використання ІХТ для опису текстур є перспективним для сертифікації

текстур, оскільки їх завдання дозволяє прогнозувати значення властивостей в будь-якому з напрямів досить простим способом.

У статті вивчали ІХТ листових полікристалів металів з гексагональними ґратами з різним міжосьовим співвідношенням  $c/a$ .

Матеріалом для досліджень були листи технічного титану і цирконію ( $c/a < 1,63$ ), цинку і кадмію ( $c/a > 1,63$ ), а також магнієвого сплаву. Пластинки титану, цирконію, кадмію і цинку прокатували за кімнатної температури до 90–95% обтискання по товщині. Магнієвий сплав прокатували за температури  $300^{\circ}$ . З отриманих пластин вирізали дископодібні зразки для рентгенодифрактометричних досліджень. Криві полюсної щільності знімали за методом Шульца [1] “на віддзеркалення” в  $\text{CuK}_{\alpha}$  випромінюванні на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3М. ПФ нормували у рівнях середньої полюсної щільності. Дефокусування при нахилі зразка до осі гоніометра враховували аналітично за методом Сегмюлера [6]. На рис. 1 показані ПФ (0002) для цинку, цирконію і магнієвого сплаву.

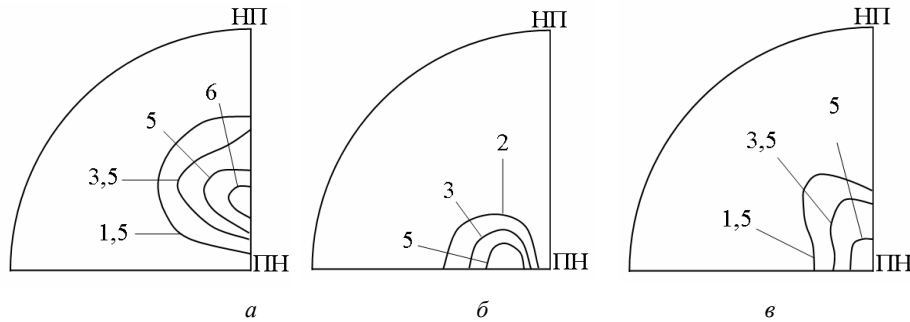


Рис. 1. Полюсні фігури: *a* – цинку; *б* – цирконію; *в* – магнієвого сплаву

Вочевидь, листові полікристали, отримані плющенням, мають орторомбічну симетрію відносно властивостей. У такій моделі ІХТ для полікристалів з гексагональною структурою кристалів мають вигляд [5]:

$$I_1^{(h)} = \langle \alpha_{13}^2 \rangle, I_2^{(h)} = \langle \alpha_{23}^2 \rangle, I_3^{(h)} = \langle \alpha_{33}^2 \rangle, I_4^{(h)} = \langle \alpha_{13}^4 \rangle, I_5^{(h)} = \langle \alpha_{23}^4 \rangle, I_6^{(h)} = \langle \alpha_{13}^2 \alpha_{23}^2 \rangle,$$

де  $\alpha_{ij}$  – направляючі косинуси, а  $\langle \rangle$  означає усереднювання за всіма орієнтаціями кристалів,  $(h)$  – приналежність до гексагональної структури.

$$\text{Незалежних ІХТ тут лише п'ять, оскільки } I_3^{(h)} = 1 - (I_1^{(h)} + I_2^{(h)}).$$

У гексагональному кристалі площина (0001) є ізотропною відносно властивостей другої і четвертої тензорної розмірності. ПФ від площини (0002) розподіляє гексагональну вісь кристала на сфері проєкцій і, отже, містить всю інформацію про анізотропію властивостей полікристала. Тоді ІХТ усереднені за цією ПФ матимуть вигляд:

$$I_1^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{S}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^3 \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta,$$

$$I_2^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{S}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^3 \alpha \cdot \sin^2 \beta \cdot P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta,$$

$$I_3^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{S}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta,$$

$$I_4^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{S}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^5 \alpha \cdot \cos^4 \beta \cdot P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta,$$

$$I_5^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{S}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^5 \alpha \cdot \sin^4 \beta \cdot P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta,$$

$$I_6^{(h)} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^5 \alpha \cdot \sin^2 \beta \cdot \cos^2 \beta \cdot P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

де,  $\mathfrak{S} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} P_{(0002)}(\alpha, \beta) \sin \alpha \cdot d\alpha d\beta$ ,  $\beta$  і  $\alpha$  – кути повороту зразка довкола нормалі до його площини і нахилу зразка до осі гоніометра.

У практиці аналізу текстури для опису текстур металів гексагональної симетрії часто користуються представленням текстури у вигляді кута  $\alpha$  нахилу гексагональної призми до площини листа. Кут нахилу може бути легко знайдений через ІХТ:

$$\sin^2 \alpha = \left| I_2^{(h)} - I_1^{(h)} \right|.$$

Тоді значення модуля Юнга в НН відшукують за формулою:

$$(E_{HH})^{-1} = s_{11} \sin^4 \alpha + s_{33} \cos^4 \alpha + (2s_{13} + s_{44}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha$$

або

$$(E_{HH})^{-1} = s_{11} + \left( s_{13} - s_{11} - \frac{1}{2} s_{44} \right) I_3^{(h)} +$$

$$(s_{11} + s_{33} - 2s_{13} - s_{44}) (1 - 2I_1^{(h)} - 2I_2^{(h)} + I_4^{(h)} + I_5^{(h)} + 2I_6^{(h)}).$$

Мовою програмування Delphi 5 була складена програма розрахунку ІХТ і значень модуля Юнга в нормальному до аркуша напрямі за даними розподілу полюсної щільності ПФ (0002). Результати розрахунку ІХТ наведені в таблиці.

*Таблиця*

Значення інтегральних характеристик текстури для листів гексагональних металів після деформації плющенням

ІХТ	Метал				
	Цинк	Кадмій	Магній	Титан	Цирконій
I <sub>1</sub>	0,31	0,3	0,2	0,196	0,2
I <sub>2</sub>	0,148	0,176	0,17	0,292	0,243
I <sub>3</sub>	0,541	0,523	0,633	0,512	0,556
I <sub>4</sub>	0,144	0,141	0,8	0,092	0,095
I <sub>5</sub>	0,056	0,077	0,75	0,135	0,11
I <sub>6</sub>	0,018	0,022	0,023	0,025	0,22

Текстури кадмію і цинку характеризуються відхиленням гексагональних осей в НП, а титану і цирконію в ПН у грубому наближенні текстури, отримані візуально безпосередньо з ПФ (0002) для цинку і кадмію описують як  $(0001) \pm \alpha$  НН-НП, а титану і цирконію  $(0001) \pm \alpha$  НН-ПН, де  $\alpha$  – нахил площини базису до площини листа [1]. З таблиці бачимо, що для кадмію і цинку  $I_1^{(h)} > I_2^{(h)}$ , а для титану і цирконію, навпаки  $I_1^{(h)} < I_2^{(h)}$ . Магній і його сплави характеризуються базисною центральною типу текстурою. Для них кут  $\alpha \approx 0^\circ$ . В разі представлення текстури за допомогою ІХТ  $I_1^{(h)} \approx I_2^{(h)}$ . Отож, перші дві ІХТ характеризують тип текстури гексагонального полікристала. Значення  $I_3^{(h)}$  лежать в одних межах для всіх п'яти металів. Ступінь деформації всіх досліджених металів приблизно однаковий. Отже, однакова і інтенсивність текстур і, мабуть,  $I_3^{(h)}$  пов'язана з мірою досконалості текстури. Співвідношення між  $I_4^{(h)}$  і  $I_5^{(h)}$  приблизно таке ж, як і між першими двома. Аби зрозуміти їх сенс потрібні додаткові дослідження текстур гексагональних металів і сплавів, отриманих в результаті різних видів і ступенів деформації і відпалу. Шості ІХТ лежать для всіх металів теж приблизно в однакових межах.

За даними ІХТ і констант податливості монокристалів [7] розрахували значення модуля Юнга в НН для досліджених металів, які становлять для титану 136 ГПа, для цирконію – 119 ГПа, для цинку – 50 ГПа, для кадмію – 32 ГПа, для магнію – 56 ГПа.

На закінчення зазначимо, що за допомогою ІХТ зручно сертифікувати текстуровані полікристали. Зі співвідношень ІХТ можна легко судити про тип текстур і прогнозувати властивості полікристалів у різних напрямках, в яких експериментальний вимір представляється досить складним завданням.

1. Текстури гексагональних металів і сплавів з відхиленням гексагональної осі у напрямі прокатування характеризуються інтегральними характеристиками із співвідношенням  $I_1^{(h)} > I_2^{(h)}$  і  $I_4^{(h)} > I_5^{(h)}$ , а з відхиленням у поперечному напрямі –  $I_1^{(h)} < I_2^{(h)}$  і  $I_4^{(h)} < I_5^{(h)}$ . Текстури базисного центрального типу характеризуються рівністю цих характеристик.

2. Інтегральні характеристики текстури містять необхідну інформацію для прогнозування тензорних властивостей в довільному напрямі і можуть бути рекомендовані для сертифікації текстурованих полікристалів.

- 
1. *Вассерман Г.* Текстуры металлических материалов / Г. Вассерман, И. Гревен. – М. : Металлургия, 1959. – 654 с.
  2. *Вишняков Я.Д.* Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко, С.А. Владимиров, И.В. Эгиз. – М. : Наука, 1979. – 344с.
  3. *Bunge H.J.* Mathematische Methoden der Texturanalyse / H.J. Bunge. – Berlin: – Akademie-Verlag, 1969. – 330 p.
  4. *Брюханов А.А.* Функция распределения текстурованных листов гексагонального  $\alpha$ -титана / А.А. Брюханов, А.Р. Гохман // Изв. АН СССР. Металлы. – 1985. – № 5. – С. 145–148.

5. Брюханов А.А. К восстановлению функции распределения кристаллов по ориентациям по ограниченному набору полюсных фигур / А.А. Брюханов, А.Р. Гохман // Заводская лаборатория. – 1984. – № 9. – С. 40–43.
6. Брюханов А.А. Количественный фазовый анализ ( $\alpha+\beta$ ) - сплавов титана из прямых полюсных фигур / А.А. Брюханов, А.Р. Гохман // Заводская лаборатория. – 1985. – № 4. – С. 47–48.
7. Шульце Г. Металлофизика / Г. Шульце. – М. : Мир, 1971. – 503 с.

## INTEGRAL CHARACTERISTICS OF THE HEXAGONAL TEXTURS

**S. Iovchev, P. Stoyanov, N. Volchok**

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

The textures of hexagonal metals sheets with different interaxial relations, rolled up to high degree of deformation were studied. Integral characteristics were calculated in the quasi-monocrystal orthotropic model from pole figures (0002). The relation between integral characteristics is defined by the type of texture. The values of Young's modulus in normal to the sheets plane were calculated.

*Key words:* hexagonal metals, texture, integral characteristics, pole figure.

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ТЕКСТУР

**С. Иовчев, П. Стоянов, Н. Волчок**

*Южноукраинский государственный педагогический университет  
имени К. Д. Ушинского, кафедра физики  
ул. Старопортофранковская, 26, 65020 Одесса, Украина  
e-mail: iovchev-serj@rambler.ru*

Изучали текстуру листов гексагональных металлов с разными межосевыми соотношениями прокатанных до высоких степеней обжатия. Интегральные характеристики текстуры рассчитывали в модели орторомбичного квазиполикристалла из прямых полюсных фигур (0002). Типом текстуры определяется соотношение между интегральными характеристиками. Рассчитаны значения модуля Юнга в нормальном к листу направлении.

*Ключевые слова:* гексагональные металлы, текстура, интегральные характеристики, полюсная фигура.

Стаття надійшла до редколегії 29.05.2009

Прийнята до друку 07.06.2010