

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

А.А. Брюханов, Н.А. Волчок, Т.С. Совкова

## ТЕКСТУРА И АНИЗОТРОПИЯ МОДУЛЯ ЮНГА ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЛИСТОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПТЗ-В

Южноукраинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского  
ул. Старопортофранковская, 26, г. Одесса, 65020, Украина  
E-mail: aabr2007@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2009 года

*Изучена текстура и анизотропия модуля Юнга листов сплава ПТЗ-В в представлении интегральных характеристик текстуры (ИХТ). По данным фурье-анализа упругой анизотропии листов сплава и ИХТ рассчитаны константы податливости монокристалла сплава и значения модуля Юнга в нормальном к плоскости листов направлении для различных степеней деформации холодной прокаткой. Предложено сертифицировать плоские гексагональные текстуры при помощи ИХТ.*

**Ключевые слова:** текстура, модуль Юнга, анизотропия, полюсная фигура, интегральные характеристики, ряды Фурье, тензор, константы податливости

### Введение

Сплав ПТЗ-В системы титан–алюминий–ванадий (4.5% Al–2.2% V–остальное Ti) часто применяют в различного рода изделиях, работающих в условиях двухосного напряженно-деформированного состояния (сосуды высокого внутреннего давления, оболочки и пр.) в авиационной, космической, судостроительной промышленности и пр. [1–3]. Сплавы этой системы производятся главным образом в виде листового проката. Текстура как важная структурная составляющая сопровождает практически все этапы производства листа, является ответственной за анизотропию свойств полуфабрикатов и готовых изделий и может служить дополнительным резервом улучшения прочностных, весовых, габаритных и прочих параметров конструкций.

Текстура сплавов титана с содержанием 3–4% алюминия и 1.5–2.2% ванадия изучалась в приближении идеальных ориентировок (ИО) в работах [4,5]. Однако такой подход не дает возможности прогнозировать анизотропию свойств листа в целом и неудобен для сертификации объектов с плоскими текстурами.

Текстурованный лист металла, полученный прокаткой, можно рассматривать как квазимонокристалл орторомбической симметрии с осями, совпа-

дающими с направлением прокатки (НП), поперечным направлением (ПН) и нормальным к плоскости листа направлением (НН). Для него анизотропия упругих свойств в плоскости листа запишется [10]:

$$\frac{1}{E(\varphi)} = s_{1111}^T \cos^4 \varphi + s_{2222}^T \sin^4 \varphi + \left( s_{1212}^T + \frac{1}{2} s_{1122}^T \right) \sin^2 2\varphi,$$

где  $s_{ijkl}^T$  – компоненты тензора податливости орторомбического квазимонокристалла, индекс  $T$  означает принадлежность компонент тензора к текстурированному листу, угол  $\varphi$  отсчитывается от НП.

Пользуясь правилами теории вероятностей по усреднению функций [11], можно найти компоненты тензора податливости текстурированного квазимонокристалла  $s_{ijkl}^T$  из функции распределения кристаллов по ориентациям, представленной, например, в пространстве углов Эйлера [10]:

$$s_{ijkl}^T = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} s'_{ijkl}(\varphi_1, \phi, \varphi_2) f(\varphi_1, \phi, \varphi_2) \sin \phi d\varphi_1 d\varphi_2,$$

где  $s'_{ijkl}(\varphi_1, \phi, \varphi_2)$  – значения констант податливости кристалла в системе координат образца,  $\sin \phi d\varphi_1 d\varphi_2 = (dg)$  – элемент объема в пространстве углов Эйлера. Переход от системы координат кристалла к системе координат образца осуществляется по известному закону [12]:

$$s'_{ijkl} = \alpha_{ij} \alpha_{ik} \alpha_{kl} \alpha_{jl} s_{ijkl},$$

где  $s_{ijkl}$  – константы податливости монокристалла в системе координат кристалла,  $\alpha_{mn}$  – направляющие косинусы.

Тогда анизотропия модуля Юнга  $E$  текстурированных листов гексагональных металлов и сплавов выражается через комбинации констант податливости монокристаллов в виде [13,14]:

$$E^{-1}(\varphi) = s_{11} + 2 \left( s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2} s_{44} \right) \psi_2^T(\varphi) + (s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}) \psi_4^T(\varphi), \quad (1)$$

где

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

– ИХТ [13,14];  $s_{ij}$  – константы податливости гексагонального монокристалла;  $\alpha_{mn}$  – направляющие косинусы гексагональной оси относительно системы координат листа, которыми являются НП, ПН и НН;  $\langle \rangle$  – усреднение по всем ориентациям кристаллов; индекс  $h$  означает принадлежность  $I_k$  к гексагональной системе;

$$\psi_2^T(\varphi) = I_1^{(h)} \cos^4 \varphi + I_2^{(h)} \sin^4 \varphi + \frac{1}{4} (I_1^{(h)} + I_2^{(h)}) \sin^2 2\varphi$$

и

$$\psi_4^T(\varphi) = I_6^{(h)} \cos^4 \varphi + I_4^{(h)} \sin^4 \varphi + 1.5 I_5^{(h)} \sin^2 2\varphi$$

– функции анизотропии текстурованных листов; угол  $\varphi$  отсчитывается от НП.

Следует отметить, что для гексагонально-орторомбических поликристаллов число независимых ИХТ не шесть, а пять, так как  $(I_1^{(h)} + I_2^{(h)} + I_3^{(h)}) = 1$ .

Причем  $\sin^2 \alpha = |I_2^{(h)} - I_1^{(h)}|$ , где  $\alpha$  – статистический угол наклона гексагональной призмы к плоскости листа. Отсюда очевидно, что значение модуля Юнга в нормальном к листу направлении может быть найдено из выражения

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

или

$$E_{\text{НН}}^{-1} = s_{11} + \left( s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2} s_{44} \right) I_3^{(h)} + (s_{11} + s_{33} - 2s_{13} - s_{44}) \left( 1 - 2I_1^{(h)} - 2I_2^{(h)} + I_4^{(h)} + I_5^{(h)} + 2I_6^{(h)} \right). \quad (2)$$

В случае полюсной фигуры (0002) ввиду изотропности плоскости базиса в отношении свойств четвертой тензорной размерности задача нахождения ИХТ упрощается. Требуется провести лишь интегрирование соответствующих произведений зависимостей полюсной плотности ПФ (0002) на  $\alpha_{i3}^n$  по сферическим углам  $\alpha$  и  $\beta$  (где  $\alpha$  – угол наклона образца к оси гониометра,  $\beta$  – угол поворота образца вокруг нормали и одновременно – азимутальный и меридианный углы на сфере проекций соответственно), выразив предварительно направляющие косинусы в сферических координатах. В результате получим:

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

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

$$I_3^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{V}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin \alpha \cos^2 \alpha P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (5)$$

$$I_4^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{V}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^5 \alpha \cos^4 \beta P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (6)$$

$$I_5^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{V}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^5 \alpha \sin^4 \beta P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (7)$$

$$I_6^{(h)} = \frac{1}{4\pi\mathfrak{V}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^5 \alpha \sin^2 \beta \cos^2 \beta P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (8)$$

где

$$\mathfrak{I} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} P_{(0002)}(\alpha, \beta) \sin \alpha d\alpha d\beta. \quad (9)$$

Деление величин ИХТ на  $\mathfrak{I}$ , полученную по формуле (9), нормирует ПФ в уровнях средней полюсной плотности.

В данной работе изучали развитие текстуры, анизотропии упругих свойств листов сплава ПТЗ-В в процессе деформации холодной прокаткой.

### Исследования и результаты

Материалом для исследований служили трехмиллиметровые листы сплава ПТЗ-В с бимодальной структурой (рис. 1) в условиях поставки (окончательная обработка – теплая прокатка + вакуумный рекристаллизационный отжиг при  $\sim 820^\circ\text{C}$ ).

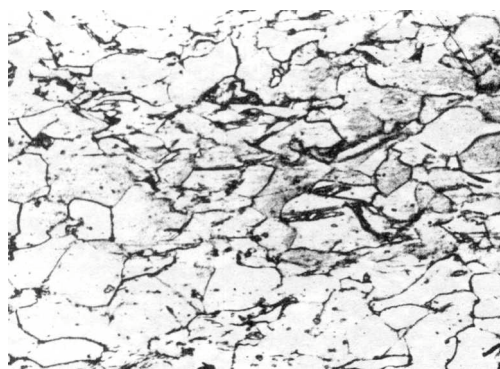


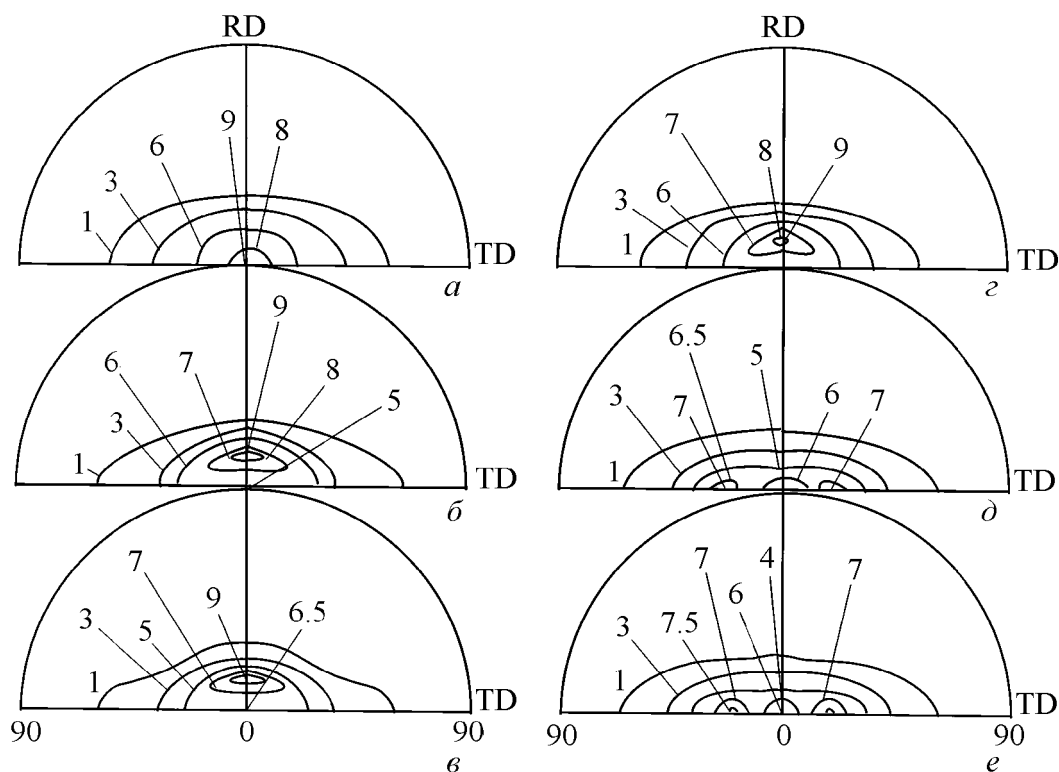
Рис. 1. Структура листов сплава ПТЗ-В после вакуумного отжига,  $\times 300$

В структуре присутствовали глобулярные зерна гексагональной  $\alpha$ -фазы и отдельные колонии этой фазы в виде пластин.

Далее полосы сплава прокатывали на стане с диаметром валков 150 mm без реверса до 20, 40, 60, 80 и 90% по толщине. Из полученных полос вырезали дискообразные образцы для рентгенодифрактометрических исследований и прямоугольные (длиной 100 mm, шириной 12 mm, под различными углами к НП через каждые  $15^\circ$ ) – для

измерения модуля Юнга. Модуль Юнга определяли динамическим методом по частоте собственных поперечных колебаний образца [10]. Постоянные решетки  $a$  и  $c$  сплава в исходном состоянии определили рентгеновским методом по стандартной методике [11]. Они составили:  $a = 4.6869 \text{ \AA}$ ,  $c = 2.9431 \text{ \AA}$ . Отношение  $c/a = 1.5925$ , что отличается в сторону увеличения от йодидного титана [12] только в третьем знаке. Фазовый анализ выявил присутствие в сплаве кубической  $\beta$ -фазы, однако ее количество не превышает 4%, и поэтому ее влияние на текстурные характеристики сплава пренебрежимо мало.

Кривые полюсной плотности снимали по методу Шульца [13] «на отражение» в  $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М для плоскостей (0002). ПФ нормировали в уровнях средней полюсной плотности [14]. Дефокусировку при наклоне образца к оси гониометра учитывали аналитически по методу Сегмюллера [15]. Периферийную часть ПФ обнуляли. На рис. 2 приведены ПФ (0002) для листов сплава для различных степеней деформации холодной прокаткой.



**Рис. 2.** Прямые полюсные фигуры (0002) листов сплава ПТЗ-В: *a* – после теплой прокатки и вакуумного отжига (состояние поставки); *б, в, г, д, е* – после дальнейшей холодной прокатки со степенями обжатия по толщине (в %) соответственно 20, 40, 60, 80 и 90. RD – направление прокатки, TD – поперечное направление

Текстура исходных листов сплава ПТЗ-В характеризуется в основном базисной центральной типа ориентировкой с рассеянием в ПН. Холодная прокатка (20–60%) приводит к формированию группы зерен с текстурой отклоненного в НП-типа. При высоких степенях деформации развивается текстура с отклонением базисных плоскостей в ПН. Фактически холодная деформация приводит к образованию двух типов текстур, с отклонением базисных плоскостей в НП на некоторый угол  $\alpha_1$  и у ПН – на угол  $\alpha_2$ . Текстура первого типа характерна для плоских текстур кадмия и цинка, металлов с осевым соотношением больше 1.63. В металлах с осевым соотношением меньше идеального, таких как титан и цирконий, при холодной прокатке формируется текстура второго типа. Вероятно, обе текстуры присутствуют и в исходных листах. Однако они на ПФ поглощаются мощной базисной центральной типа ориентировкой, во всяком случае выделить какую-либо одну ориентировку, ответственную за анизотропию свойств листов сплава в приближении ИО, не представляется возможным.

В таблице приведены значения ИХТ листов сплава ПТЗ-В для различных степеней деформации холодной прокаткой, рассчитанные по формулам (3)–(9). Существенно, что для всех степеней деформации выполняется аналитическое условие  $(I_1^{(h)} + I_2^{(h)} + I_3^{(h)}) = 1$ , что свидетельствует об удовлетворительной точности экспериментальных и расчетных данных.

**Значения параметров листов сплава ПТЗ-В  
для различных степеней деформации холодной прокаткой**

Параметры	Степень деформации прокаткой, %					
	исходное состояние	20	40	60	80	90
Интегральные характеристики текстуры $I_n^{(h)}$						
$I_1$	0.060787	0.06388	0.056707	0.066276982	0.052009	0.052906
$I_2$	0.17624	0.191622	0.1862	0.199140089	0.247415	0.251211
$I_3$	0.762973	0.744498	0.757092	0.734582929	0.700577	0.695883
$I_4$	0.009337	0.008813	0.007271	0.009554601	0.007122	0.007555
$I_5$	0.068773	0.081246	0.075716	0.082621875	0.11262	0.115883
$I_6$	0.023569	0.024624	0.025071	0.023434842	0.022547	0.020918
Амплитуды гармоник разложения в ряды Фурье $A_{ij} \cdot 10^{-11}$ экспериментальных зависимостей модуля Юнга от направления измерения, $m^2/N$						
$A_0$	0.89978	0.93290	0.93592	0.931034	0.93653	0.93749
$A_2$	0.03408	0.05139	0.04216	0.038065	0.04754	0.04914
$A_4$	0.00028	0.00104	0.000414	0.000041	0.00180	0.00189
Константы податливости $s_{ij} \cdot 10^{-11}$ , $m^2/N$						
$s_{11}$	1.137203	1.107374	1.172812	1.094696	1.007874	0.982844
$s_{33}$	0.752159	0.719767	0.774022	0.730048	0.649512	0.632539
$s_{44}$	2.274406	2.214749	2.345623	2.189392	2.015748	1.965688
$s_{13}$	-0.18953	-0.18456	-0.19547	-0.18245	-0.167979	-0.163807
Модуль Юнга, GPa						
$E$	101.1427	104.3454	98.0641	104.0773	113.9586	116.7932

По формуле  $\sin^2 \alpha = \left| I_2^{(h)} - I_1^{(h)} \right|$  рассчитали статистический угол наклона гексагональной призмы к плоскости листов сплава ПТЗ-В. Он составил: для исходных листов  $\alpha = 19.8^\circ$ , для листов, прокатанных до степеней обжатия 20, 40, 60, 80 и 90%, – соответственно  $\alpha = 20.9; 21.10; 21.3; 26.2$  и  $26.4^\circ$ . Таким образом, текстуру листов можно рассматривать в среднем как эллиптическую с полуосями в ПН, соответствующем приведенным углам.

На рис. 3, 4 приведены кривые анизотропии модуля Юнга листов сплава в исходном состоянии и деформированных холодной прокаткой. Исходные листы обладают значительной анизотропией  $E$ , коэффициент анизотропии  $\eta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\min}} \cdot 100\%$  составил 8%. Холодная прокатка повышает анизотропию листов,  $\eta$  растет до  $\sim 12\%$ .

По формуле (1) рассчитали анизотропию модуля в плоскости листов сплава в зависимости от степени деформации холодной прокаткой. В качестве монокристаллических характеристик использовали данные констант податливости для чистого титана (таблица) [16]. Результаты приведены на рис. 4.

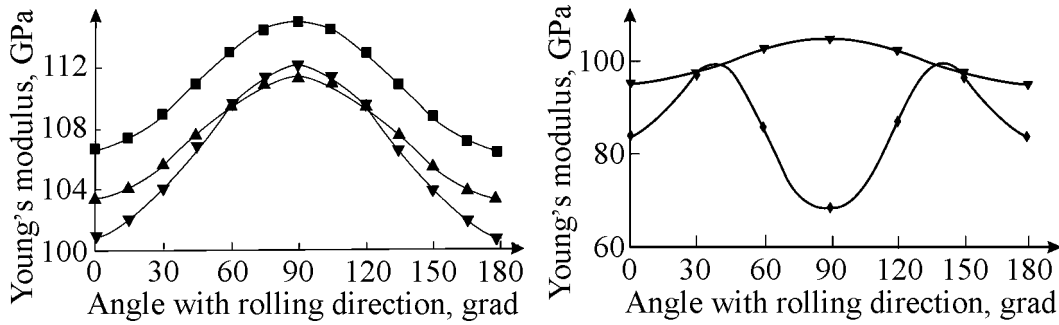


Рис. 3. Экспериментальные кривые анизотропии модуля Юнга в плоскости листов сплава ПТЗ-В в исходном состоянии (—■—) и после деформации прокаткой до 60 (—▲—) и 90% (—▼—) обжатия

Рис. 4. Сравнительные экспериментальная (—▼—) и расчетная (—◆—) кривые анизотропии модуля Юнга листов сплава ПТЗ-В, деформированных до 90% обжатия

Теоретические кривые анизотропии модуля Юнга существенно отличаются от экспериментальных не только по абсолютным значениям модулей, но и по характеру анизотропии. Это свидетельствует о том, что монокристалльные характеристики сплава также отличны от таковых для чистого титана.

Прямым интегрированием выражения (1) получили формулы для амплитуд гармоник представления анизотропии модуля Юнга в виде рядов Фурье. Поскольку функция (1) является четной, в модели ортотропного поликристалла такие ряды содержат только вторые и четвертые гармоники ряда Фурье в виде

$$E^{-1}(\varphi) = A_0 + A_2 \cos 2\varphi + A_4 \cos 4\varphi,$$

$$A_0 = s_{11} + \left( s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2} s_{44} \right) (I_1 + I_2) + \frac{3}{8} (s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}) (I_4 + 2I_5 + I_6),$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left[ (2s_{13} - 2s_{11} + s_{44}) (I_1 - I_2) + (s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}) (I_6 - I_4) \right],$$

$$A_4 = \frac{1}{8} (s_{11} + s_{33} - 2s_{13} - s_{44}) (I_4 + I_6 - 6I_5).$$

Экспериментальные зависимости обратной величины модуля Юнга от направления измерения для листов сплава также представили в виде рядов Фурье (таблица).

Используя данные таблицы, рассчитали значения  $s_{11}$  и комбинации констант податливости  $s_{13} + \frac{1}{2} s_{44}$  для исходных листов сплава и после прокатки:

$$s_{11} = A_0 - \frac{A_2 (I_1 + I_2)}{I_1 - I_2} + 4 \frac{A_4 (I_6 - I_4) (I_1 + I_2)}{(I_1 - I_2) (I_4 + I_6 - 6I_5)} - 3 \frac{A_4 (I_4 + I_6 + 2I_5)}{(I_4 + I_6 - 6I_5)},$$

$$2s_{13} - 2s_{11} + s_{44} = \frac{2A_2}{I_1 - I_2} - 8A_4 \frac{I_6 - I_4}{(I_1 - I_2) (I_4 + I_6 - 6I_5)},$$

$$s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44} = \frac{8A_4}{(I_4 + I_6 + 6I_5)}.$$

Учитывая тот факт, что для гексагональных металлов (с межосевым соотношением  $c/a$  меньше идеального) константа  $s_{44}$  примерно в 12 раз по абсолютной величине больше  $s_{13}$  [16], нашли значения констант податливости (таблица).

Константы податливости монокристаллов сплава  $s_{11}$  выше таковых для чистого титана. Деформация холодной прокаткой приводит вначале к уменьшению  $s_{11}$ , а затем к ее росту. Примерно также ведут себя и константы  $s_{33}$  и  $s_{44}$ . Величина  $s_{13}$  не меняется при малых и средних степенях деформаций холодной прокаткой, а затем уменьшается при высоких степенях.

По формуле (2) рассчитали значения модуля Юнга в НН. Результаты приведены в таблице.

Значение  $E_{НН}$  существенно растет при высоких степенях деформации холодной прокаткой, как и  $s_{33}$ . При малых и средних степенях деформации величина  $E_{НН}$  колеблется около некоторого среднего значения.

Минимальной анизотропией упругих свойств и достаточно высоким значением модуля Юнга в нормальном к плоскости листов направлении обладают листы в исходном состоянии (теплая прокатка + вакуумный отжиг). Такие листы предпочтительно использовать в задачах по созданию конструкций, работающих в условиях двухосного напряженно-деформированного состояния (сферические сосуды высокого внутреннего давления). При одноосных нагрузках предпочтительно использовать листы, деформированные холодной прокаткой в поперечном направлении до высоких степеней деформаций.

### Выводы

1. Интегральные характеристики текстуры содержат информацию об анизотропии свойств четвертой тензорной размерности листовых гексагональных металлов и сплавов и могут быть использованы для сертификации листовых материалов по текстурным параметрам.

2. По результатам гармонического анализа экспериментальной анизотропии модуля Юнга в плоскости листов сплава ПТЗ-В определили его монокристалльные характеристики и значения модуля Юнга в нормальном к плоскости листов направлении.

3. Минимальной анизотропией упругих свойств и высоким значением модуля Юнга в нормальном к листу направлении обладают листы сплава ПТЗ-В в условиях поставки (теплая прокатка + вакуумный рекристаллизационный отжиг при  $\sim 820^\circ\text{C}$ ). Использование таких листов предпочтительно для изделий, эксплуатируемых в условиях двухосного напряженно-деформированного состояния.

4. Холодная прокатка листов сплава ПТЗ-В приводит к образованию сложной текстуры двух типов с отклонением гексагональной оси в направ-



лении прокатки и в поперечном направлении, что приводит к росту анизотропии свойств до 12%. Для изделий, работающих в условиях одноосного нагружения, целесообразно использовать листы в поперечном направлении.

1. *А.Н. Петрунько, Ю.Г. Олесов, В.А. Дрозденко*, Титан в новой технике, Металлургия, Москва (1979).
2. *С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев*, Конструкционные титановые сплавы, Металлургия, Москва (1974).
3. *В.А. Скородумов, Д.С. Абрамов, В.А. Александров*, Основные тенденции развития зарубежной титановой промышленности, ЦНИИ экон. и инф. цв. металлургии, Обзор инф. Сер. экон. цв. металлургии № 4, 1 (1989).
4. *А.А. Брюханов, Т.С. Совкова, В.В. Усов*, ФММ **50**, 1108 (1980).
5. *А.С. Шишмаков, Р.А. Адамеску, П.В. Гельд*, Изв АН СССР, Металлы № 2, 123 (1972).
6. *А.А. Брюханов, А.Р. Гохман*, Изв. вузов. Физика № 9, 127 (1985).
7. *А.А. Брюханов*, Автореф. докторской диссертации, МИСиС, Москва (1988).
8. *А.Д. Манита*, Теория вероятностей и математическая статистика, Изд. УНЦ ДО МГУ, Москва (2001).
9. *H.J. Bunge*, Mathematische Methoden der Texturanalyse, Akademie-Verlag, Berlin (1969).
10. *А.О. Брюханов*, УФЖ **10**, 104 (1965).
11. *С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков*, Рентгенографический и электронно-оптический анализ, Металлургия, Москва (1970).
12. *Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко, С.А. Владимиров, И.В. Эгиз*, Теория образования текстур в металлах и сплавах, Наука, Москва (1979).
13. *Г. Вассерман, И. Гревен*, Текстуры металлических материалов, Металлургия, Москва (1959).
14. *А.Р. Гохман, А.А. Брюханов*, Заводская лаборатория **55**, № 6, 52 (1989).
15. *А.А. Брюханов, А.Р. Гохман*, Заводская лаборатория **51**, № 4, 47 (1985).
16. *Г. Шульце*, Металлофизика, Мир, Москва (1971).

*А.О. Брюханов, Н.А. Волчок, Т.С. Совкова*

## ТЕКСТУРА І АНІЗОТРОПІЯ МОДУЛЯ ЮНГА ХОЛОДНОКАТАНИХ ЛІСТІВ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ПТЗ-В

Вивчено текстуру і анизотропію модуля Юнга листів сплаву ПТЗ-В у представленні інтегральних характеристик текстури (ІХТ). За даними фур'є-аналізу пружної анизотропії листів сплаву та ІХТ розраховано константи податливості монокристала сплаву і значення модуля Юнга в нормальному до площини листа напрямку для різних ступенів деформації прокаткою. Пропонується сертифікувати плоскі гексагональні текстури за допомогою ІХТ.

**Ключові слова:** текстура, модуль Юнга, анизотропія, полюсна фігура, інтегральні характеристики, ряди Фур'є, тензор, константи податливості

*A.A. Brjukhanov, N.A. Volchok, T.S. Sovkova*

## TEXTURE AND ANISOTROPY OF YOUNG'S MODULUS OF THE COLD ROLLED SHEETS OF TITANIUM ALLOY PT3-V

Texture and anisotropy of the Young's modulus of the PT3-V alloy sheets have been studied within the texture integral characteristics (TIC) representation. By the data of Fourier analysis of the alloy sheet elastic anisotropy and from TIC representation, the compliance of alloy single crystal and values of the Young's modulus in direction normal to sheet plane have been calculated for different degrees of deformation by cold rolling. It is proposed to certify the flat hexagonal textures using the TIC.

**Keywords:** texture, Young's modulus, anisotropy, pole figure, integral characteristics, Fourier series, compliance constants

**Fig. 1.** Structure of alloy PT3-V sheets after vacuum annealing,  $\times 300$

**Fig. 2.** Direct pole figures (0002) of PT3-V alloy sheets after: *a* – warm rolling and vacuum annealing (the as-delivered state); *b*, *v*, *z*, *d*, *e* – further cold rolling with percent reduction in thickness of 20, 40, 60, 80, 90, respectively. RD – rolling direction, TD – transverse direction

**Fig. 3.** Experimental curves of Young's modulus anisotropy in the plane of PT3-V alloy sheets in initial state (—■—) and after deformation by rolling to 60 (—▲—) and 90% (—▼—) reduction

**Fig. 4.** Comparative experimental (—▼—) and calculated (—◆—) curves of Young's modulus anisotropy of PT3-V alloy sheets deformed to 90% reduction