

УДК 669.549.26:548.735.6.

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА ТЕКСТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИСТОВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ti–Al

Н. А. ВОЛЧОК, Т. С. СОВКОВА, П. А. БРЮХАНОВ

Южноукраинский национальный педагогический университет им. К. Д. Ушинского, Одесса

Выявлено, что холодная прокатка сплавов системы Ti–Al с содержанием алюминия 2...4% приводит к развитию в листах текстуры с отклонением базисных полюсов в направлении прокатки, характерной для текстур “типа цинка”, а при деформации ~80% сплавов с содержанием алюминия ~2% к ней добавляется компонента с отклонением полюсов [0001] в поперечном направлении, свойственным для текстур “типа титана”. Для сплава Ti–4% Al при 80%-ой деформации текстура прокатки базисная центральная. В соответствии с текстурными изменениями в листах сплавов титана с различным содержанием алюминия с ростом степени деформации прокаткой увеличивается вклад функции анизотропии с периодичностью $[0-\pi/2]$ в анизотропию упругих свойств, что проявляется в смещении значений максимумов модуля Юнга в сторону меньших углов от направления прокатки в листах промышленных сплавов Ti–3Al–1,5V и ПТЗ-В.

Ключевые слова: *титан, алюминий, сплавы, деформация, прокатка, текстура, компонента, интегральные характеристики, анизотропия, модуль Юнга.*

При разработке титановых сплавов как основной легирующий элемент используют алюминий, так как его плотность меньше, нежели титана. Кроме того, он сравнительно дешевле, доступен и широко распространен в природе. Легирование титана алюминием повышает удельную прочность, эффективно упрочняет как α -, так и $\alpha+\beta$ -сплавы, существенно увеличивает жаропрочность титановых сплавов, а также их модули упругости [1, 2]. Он повышает температуру аллотропического превращения титана и образует обширную область твердых растворов на основе α -титана [3]. Однако с возрастанием его содержания более 4% резко усиливается склонность сплавов к охрупчиванию в результате выделения α_2 -фазы (Ti₃Al), а также ухудшаются пластические свойства и технологическая пластичность. Чтобы избежать появления в структуре α_2 -фазы, в сплавы вводят небольшое количество ванадия, который расширяет β -область (является β -стабилизатором), препятствуя образованию сверхструктуры α_2 . В результате повышается прочность и жаропрочность сплавов, а также улучшается их технологичность. В зависимости от содержания алюминия в титановых сплавах изменяется также и механизм пластической деформации, вследствие чего текстуры их сжатия, растяжения, прокатки отличаются, а следовательно, и анизотропия их свойств [4].

Цель работы – изучить изменение текстуры при холодной прокатке сплавов титана с различным содержанием алюминия.

Материалы и методика. Экспериментальные сплавы изготавливали из йодидного титана и химически чистого алюминия зонной плавкой в атмосфере аргона с двойной переплавкой, обеспечивающей гомогенное распределение элементов по объему. Чтобы исключить вероятность появления хрупкой α_2 -фазы (Ti₃Al), их легировали 0,5% ванадия. Предварительно обрабатывали по стандарт-

ной схеме (горячая прокатка + очистка поверхностей стравливанием в 40% растворе едкого калия + вакуумный отжиг при 820°C). Сплавы прокатывали при комнатной температуре до 20; 40; 60 и 80% обжатия по толщине. Текстуру изучали рентгеновским методом с построением прямых полных полюсных фигур (ПФ) {0002} на дифрактометре ДРОН-3М в CuK_α -излучении. ПФ нормировали в уровнях средней полюсной плотности [5]. Дефокусирование при наклоне образца к оси гониометра учитывали аналитически по методу Сегмюллера [5].

Обычно текстуры представляют в виде идеальных ориентировок, которые определяют путем анализа ПФ [6], либо рассчитывают из данных представления текстуры в виде функций распределения кристаллов по ориентациям (ФРО) [7]. Однако такой подход не позволяет непосредственно определить анизотропию свойств текстурированных поликристаллов. Показано [8], что ФРО для орторомбических поликристаллов (листы, полосы и пр.) можно свести к сверткам, отвечающим именно анизотропии свойств второй и четвертой тензорных размерностей. Тогда текстуру листов гексагональных металлов описывают с помощью интегральных характеристик текстуры (ИХТ) – комбинаций направляющих косинусов оси c относительно системы координат образца, в качестве которых используют направление прокатки (НП), поперечное к НП направление (ПН) и нормальное к плоскости листа (НН). ИХТ рассчитывают по формулам [8]:

$$I_1 = \langle \alpha_{13}^2 \rangle, I_2 = \langle \alpha_{23}^2 \rangle, I_3 = \langle \alpha_{33}^2 \rangle, I_4 = \langle \alpha_{13}^4 \rangle, I_5 = \langle \alpha_{23}^4 \rangle, I_6 = \langle \alpha_{13}^2 \alpha_{23}^2 \rangle, \quad (1)$$

где α_{ik} – косинусы углов, задающих ориентацию кристалла относительно координат образца; скобки – усреднение по всем ориентациям кристаллов. Для текстур листовых гексагональных поликристаллов независимых ИХТ только пять, так как $I_1 + I_2 + I_3 = 1$.

Усреднять можно по любой весовой функции текстуры. Однако можно воспользоваться и прямой ПФ от изотропной плоскости. Для гексагональных металлов это может быть ПФ {0002}. Тогда (1) примут вид:

$$I_i = \frac{1}{2\pi\mathfrak{Z}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin^n \alpha \cdot \cos^m \beta \cdot P_{(0002)}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (2)$$

$$\text{где} \quad \mathfrak{Z} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} P_{(0002)}(\alpha, \beta) \sin \alpha \cdot d\alpha d\beta \quad (3)$$

обеспечивает нормирование ПФ в уровнях средней полюсной плотности [9].

Анизотропия модуля Юнга в плоскости текстурированного листа гексагональных металлов в представлении ИХТ примет вид

$$E^{-1}(\varphi) = s_{11} + K_1 \psi_2^T(\varphi) + K_2 \psi_4^T(\varphi), \quad (4)$$

$$\text{где} \quad \psi_2(\varphi) = I_1 \cos^4 \varphi + I_2 \sin^4 \varphi + \frac{1}{4}(I_1 + I_2) \sin^2 2\varphi, \quad (5)$$

$$\psi_4 = I_6 \cos^4 \varphi + I_4 \sin^4 \varphi + 1,5 I_5 \sin^2 2\varphi. \quad (6)$$

Здесь $K_1 = 2 \left(s_{13} - s_{11} + \frac{1}{2} s_{44} \right)$; $K_2 = s_{33} + s_{11} - 2s_{13} - s_{44}$; s_{ik} – константы податливости монокристалла, угол φ отсчитывали от НП.

Из формул (5), (6) следует, что характер анизотропии свойств, в данном случае четвертой тензорной размерности, определяется набором интегральных характеристик текстуры, которые можно найти непосредственно из прямых полюсных фигур {0002}, построенных по данным рентгенодифрактометрических измерений.

Исследования и результаты. На рис. 1 приведены ПФ $\{0002\}$. В исходном состоянии текстуры листов титана и его сплавов с содержанием алюминия до 4% центральные базисного типа, но с различным рассеянием. Если для титана рассеяние полюсов $\langle 0001 \rangle$ наблюдается в поперечном направлении, то после его легирования 2% алюминия оно уменьшается в этом направлении и увеличивается в НП. После холодной деформации в НП в интервале углов $20 \dots 30^\circ$ выделяются четкие максимумы, которые с увеличением степени деформации становятся более интенсивными. Компонента $[0001]$ в центре ПФ ослабевает, но не исчезает, а сохраняется на некотором уровне. Уменьшается рассеяние центральной базисной компоненты и стабилизируется уровень отклоненной базисной.

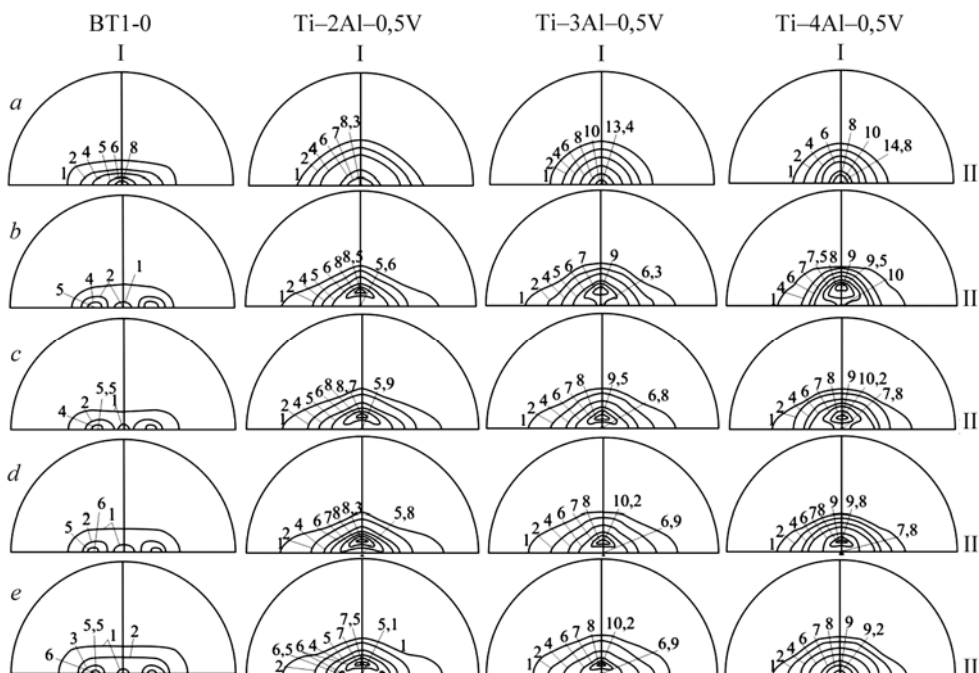


Рис. 1. Полусные фигуры $\{0002\}$ листов сплавов системы Ti-Al в исходном состоянии (a) и после деформации холодной прокаткой до 20; 40; 60 и 80% (b-e) в зависимости от содержания алюминия (%): I – направление прокатки; II – поперечное направление.

Fig. 1. Pole figures $\{0002\}$ of system Ti-Al alloys sheets in initial state (a) and cold rolled up to 20, 40, 60 и 80% (b-e) on dependence of aluminum content (%): I – rolling direction; II – transversal direction.

После холодной прокатки (до 20% обжатия по толщине) листов титана, легированного алюминием, на ПФ $\{0002\}$ наблюдаются четкие максимумы в интервале углов $10 \dots 20^\circ$ в НП, т. е. в текстуре выделяется как самостоятельная базисная ориентировка отклоненного в НП типа, характерная [6] для текстур “типа цинка”. При увеличении степени деформации до 60% эти текстурные компоненты смещаются к центру ПФ. При деформациях $\sim 80\%$ и более в текстуре листов сплава Ti-2Al появляется компонента с отклонением полюсов $\langle 0001 \rangle$ в поперечном направлении на $\sim 20^\circ$. В ней присутствуют компоненты и “типа цинка”, и “типа титана”. Текстура листов сплава Ti-4Al переходит в текстуру центрального базисного типа с рассеянием в ПН.

По кривым полюсной плотности ПФ из выражений (2), (3) рассчитали ИХТ (I_1-I_6), изменения которых для листов сплавов титана с различным содержанием алюминия в исходном состоянии и для некоторых степеней деформации холодной прокаткой иллюстрирует рис. 2.

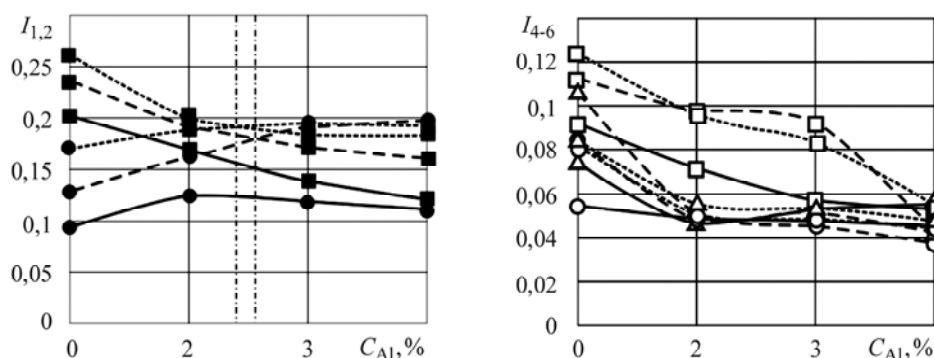


Рис. 2. Зависимость интегральных характеристик текстуры I_1 (●), I_2 (■), I_4 (○), I_5 (□), I_6 (△) от содержания алюминия для листов сплавов Ti–Al после рекристаллизационного отжига (сплошная линия), а также холодной прокатки до 20 (штриховая) и 80% (пунктирная) обжатия.

Fig. 2. The dependence of the texture integer parameters I_1 (●), I_2 (■), I_4 (○), I_5 (□), I_6 (△) of aluminum content for Ti–Al alloys sheets after recrystallization annealing (continuous line) and successive cold rolling up to 20 (dashed) and 80% (dotted) reducing.

В исходном (отожженном) состоянии вторая интегральная характеристика превышает первую, разница между ними существенная для сплава VT1-0, а с увеличением содержания алюминия их значения сближаются и для сплава Ti–4Al становятся практически одинаковыми. Такое поведение [10] отвечает развитию базисной или кольцевой составляющих текстуры и ослаблению отклоненной. Аналогично поведение и характеристик I_4 – I_6 , значения которых сближаются с увеличением содержания алюминия. Однако разница между значениями I_4 – I_6 в листах сплава VT1-0 меньше, нежели между I_1 и I_2 . Это соответствует большему вкладу в анизотропию тензорных свойств листов сплава VT1-0 функции анизотропии с периодичностью $[0-\pi]$, нежели функции с периодичностью $[0-\pi/2]$ [12].

Для сплавов титана, деформированных холодной прокаткой более 20%, значения I_1 и I_2 сближаются быстрее и становятся равными при содержании алюминия ~1,55%. Для сплавов с более высоким содержанием алюминия значения I_1 превышают значения I_2 , что соответствует превалированию в текстуре компоненты с отклонением гексагональной оси в продольном направлении. Значения I_4 и I_6 в зависимости от содержания алюминия в сплаве меняются одинаково в отожженном и деформированном прокаткой состояниях. Для сплава VT1-0 параметр I_6 несколько больше, чем I_4 в отожженном состоянии. С увеличением деформации прокаткой разница между ними уменьшается и после деформации с обжатием 80% и более их значения становятся практически равными. Алюминий в сплаве ускоряет сближение значений I_4 и I_6 и эти ИХТ становятся практически равными для всех состояний уже в сплаве Ti–2Al.

Значения I_5 в листах сплава VT1-0 с увеличением деформации несколько возрастает и незначительно уменьшается с ростом содержания алюминия до 3%. С повышением его содержания до 4% значение I_5 уменьшается более резко и для сплавов титана с содержанием алюминия ~4% ИХТ I_4 , I_5 , I_6 становятся примерно одинаковыми.

ИХТ описывают анизотропию свойств четвертой тензорной размерности (упругие свойства) текстурованных поликристаллов, обладающих орторомбической симметрией (листы, полосы и пр., полученные различными видами прокатки и последующей термической обработки). Для этого используют функции анизотропии $\Psi_2(\varphi)$ и $\Psi_4(\varphi)$, одна из которых обладает периодичностью $[0-\pi]$, а вторая – $[0-\pi/2]$. Вклад каждой из них зависит от их собственных значений и комбинаций констант податливости соответствующих монокристаллов. Для титана

$|K_1| > |K_2|$ примерно в шесть раз. Средние значения $\Psi_2(\varphi)$ превышают таковые функции $\Psi_4(\varphi)$ для недеформированных листов сплавов VT1-0. Поэтому характер анизотропии упругих свойств листов сплава VT1-0 определяет функция $\Psi_2(\varphi)$, что проявляется в монотонном росте модуля Юнга от продольного направления к поперечному [10]. Причем с развитием текстуры прокатки, которая характеризуется увеличением угла наклона гексагональной призмы к плоскости прокатки до $30 \dots 40^\circ$, разница между значениями E в обоих направлениях увеличивается. Поведение модуля сдвига противоположное: его значение в продольном направлении больше, чем в поперечном. В промышленных сплавах Ti-3Al-1,5V и ПТЗ-В $|K_1| > |K_2|$ только в два раза и с увеличением деформации холодной прокаткой уменьшается до 1,2...1,5. Поэтому здесь вклад в анизотропию упругих свойств функции с периодичностью $[0-\pi/2]$ становится существенным и максимум модуля Юнга смещается в сторону меньших углов относительно продольного направления [11, 12]. Кроме того, коэффициент анизотропии ($\eta = (\psi_i^{\max} - \psi_i^{\min}) / \psi_i^{\max}$) функции $\Psi_4(\varphi)$ больше, чем функции $\Psi_2(\varphi)$, и с повышением содержания алюминия растет с увеличением деформации (рис. 3).

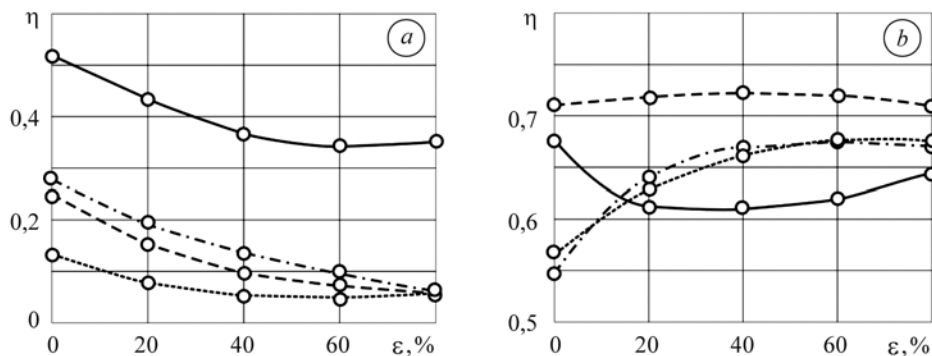


Рис. 3. Зависимость коэффициентов анизотропии функций $\Psi_2(\varphi)$ (a), $\Psi_4(\varphi)$ (b) от деформации холодной прокаткой сплавов VT1-0 (сплошная линия), Ti-2% Al (штриховая), Ti-3% Al (пунктирная), Ti-4% Al (штрихпунктирная).

Fig. 3. The dependence of the anisotropy coefficients for functions $\Psi_2(\varphi)$ (a), $\Psi_4(\varphi)$ (b) of the cold rolling deformation rate for alloys VT1-0 (continuous line), Ti-2% Al (dashed), Ti-3% Al (dotted), Ti-4% Al (dashdot).

Это, в свою очередь, повышает роль функции $\Psi_4(\varphi)$ в формировании характера анизотропии упругих свойств листов сплавов титана с содержанием алюминия 3...4%.

ВЫВОДЫ

Интегральные характеристики текстуры поликристаллов орторомбической симметрии, представляющие собой комбинации направляющих косинусов гексагональной оси относительно координат образца, определяют характер анизотропии тензорных свойств и могут быть использованы для оценки анизотропии листов гексагональных металлов и сплавов в зависимости от их химического состава, вида и степени деформации прокаткой. Алюминий в сплавах Ti-Al существенно влияет на характеристики их текстур. Установлено, что холодная прокатка сплавов с содержанием алюминия 2...4% вызывает развитие в листах текстуры с отклонением базисных полюсов в продольном направлении, характерной для текстур “типа цинка”, а при деформации $\sim 80\%$ сплавов с содержанием алюминия $\sim 2\%$ к ней добавляется компонента с отклонением полюсов $[0001]$ в поперечном направлении, что характерно для текстур “типа титана”. Для сплава Ti-4% Al при

80% деформации текстура прокатки базисная центральная. В соответствии с текстурными изменениями в листах сплавов титана с различным содержанием алюминия при увеличении деформации прокаткой усиливается вклад функции анизотропии с периодичностью $[0-\pi/2]$ в анизотропию упругих свойств, что проявляется в смещении значений максимумов модуля Юнга в сторону меньших углов от направления прокатки в промышленных листах сплавов Ti-3Al-1,5V и ПТЗ-В.

РЕЗЮМЕ. Встановлено, що холодне вальцювання сплавів системи Ti-Al з вмістом алюмінію 2...4% призводить до розвитку в листах текстури з відхиленням базисних полюсів у поздовжньому напрямку, характерного для текстур "типу цинку", але за деформації 80% сплавів з вмістом алюмінію ~2% додається ще компонента з відхиленням полюсів [0001] в поперечному напрямку, характерним для текстур "типу титану". Для сплаву Ti-4% Al при 80% деформації текстура вальцювання базисна центральна. Відповідно до текстурних перетворень у листах сплавів титану з різним вмістом алюмінію зі збільшенням деформації вальцювання зростає внесок функції анизотропії з періодичністю $[0-\pi/2]$ в анизотропію пружних властивостей, що проявляється в зміщенні значень максимумів модуля Юнга в бік менших кутів від напрямку вальцювання в промислових сплавах Ti-3Al-1,5V і ПТЗ-В.

SUMMARY. The effect of aluminum content in system Ti-Al alloys on texture under cold rolling deformation was investigated. Cold rolling of titanium alloys with 2...4% of aluminum brings to developing the texture of the sheets with base poles deflected to the rolling direction representative to "zinc type" texture, but under high degrees of deformations (80%) the component with poles [0001] deflected to the transverse direction representative to "titanium type" in alloy with ~2% aluminum content is added. The alloy Ti-4% Al rolled up to 80% reducing possesses the central base texture. In line with texture transformations in titanium alloys sheets with different aluminum content under increasing the rolling deformation the contribution of anisotropy function with $[0-\pi/2]$ periodicity to anisotropy of elastic properties increases, what expressed by drift Young's modulus maximum values to the lesser angles to the rolling direction in industry alloys Ti-3Al-1.5V and ПТЗ-В.

1. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 369 с.
2. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
3. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справ. Т. 3, Кн. 2. – М.: Машиностроение, 2000. – 448 с.
4. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабарэко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз. – М.: Наука, 1979. – 344 с.
5. Гохман А. Р., Брюханов А. А. К учету дефокусировки при исследованиях сплавов с механически нестабильным фазовым составом // Заводская лаборатория. – 1989. – 52, № 6. – С. 52–54.
6. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. – М.: Металлургия, 1959. – 654 с.
7. Bunge H. J. Mathematische Methoden der Texturanalyse. – Berlin.: Akademie-Verlag, 1969. – 330 p.
8. Брюханов А. А., Гохман А. Р. Интегральные характеристики текстуры кубических и гексагональных металлов // Изв. вузов. Физика. – 1985. – № 9. – С. 127–131.
9. О методе сертификации листового проката по характеристикам текстуры / А. А. Брюханов, А. Р. Гохман, М. Родман и др. // Производство проката. – 2011. – № 2. – С. 32–39.
10. Волчок Н. А. Кількісні характеристики текстури і анизотропії пружних властивостей деформованих α -твердих розчинів на основі титану: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – Одеса, 2011. – 20 с.
11. Брюханов А. А., Волчок Н. А., Совкова Т. С. Влияние холодной прокатки на характеристики текстуры и анизотропию свойств α -сплава Ti-3Al-1,5V // Материаловедение. – 2010. – № 4. – С. 9–14.
12. Брюханов А. А., Волчок Н. А., Совкова Т. С. Текстура и анизотропия модуля Юнга холоднокатаных листов титанового сплава ПТЗ-В // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – 20, № 1. – С. 123–132.

Одержано 15.05.2012