

PACS: 61.50.-f, 81.40.Vw

В.В. Усов¹, Н.М. Шкатуляк¹, П.А. Брюханов¹, Я.Е. Бейгельзимер²

ТЕКСТУРА ТИТАНА ПОСЛЕ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

¹Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского
ул. Старопортофранковская, 26, г. Одесса, 65020, Украина

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Исследована кристаллографическая текстура сплава титана VT1-0 после винтовой экструзии (ВЭ). Показано, что формирование текстуры в процессе ВЭ может быть обусловлено не только действием базисной, призматической, пирамидальной систем скольжения и двойникования сжатия, но и вихревым движением фрагментов измельчающихся зерен, подобным турбулентному течению жидкости.

Ключевые слова: текстура, титан, винтовая экструзия, интенсивная пластическая деформация

В настоящее время наблюдается быстро возрастающий интерес к получению так называемых объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, получаемых посредством приложения интенсивных пластических деформаций (ИПД) [1]. Структурные элементы таких материалов имеют размеры 10–100 nm (нано-) и 100–1000 nm (субмикро-), что сопоставимо с характеристической длиной различных физических явлений (размером петли Франка–Рида для скольжения дислокаций, длиной свободного пробега электронов для электрокинетических явлений, размером домена для магнитных явлений и т.д.) [2]. Вследствие этого сильнодеформированные металлы приобретают качественно новые свойства, многие из которых представляют практический интерес. В частности, они обладают аномально-высокой пластичностью в сочетании с большой прочностью [1]. Имеются результаты, указывающие на возможность получения сверхпластичности некоторых металлов при комнатных температурах. В сильнодеформированном состоянии значительно изменяются и фундаментальные характеристики металлов, такие как упругие модули, температуры Кюри и Дебая, намагниченность насыщения и др. [2–5].

В настоящее время доступны многочисленные методы обработки ИПД. Основные из них, уже применяемые для производства объемных УМЗ-материалов, – это кручение под высоким давлением, винтовая экструзия, всесторонняя ковка, равноканальное угловое прессование (РКУП), накапливающееся соединение прокаткой, циклическая экструзия и сжатие, повторяющееся

гофрирование и выпрямление. Эти различные процессы обрисованы в общих чертах в [2], а некоторые структурные аспекты и уникальные свойства объемных УМЗ-материалов и перспективы их применения представлены в [1].

Известно, что одним из главных структурных состояний кристаллических тел является кристаллографическая текстура, которая может быть причиной брака в изделиях [6] и служить значительным резервом улучшения их эксплуатационных качеств [6]. Структуру объемных УМЗ-материалов после ИПД изучают практически в каждой из указанных работ. Вместе с тем исследованию развития текстуры в процессе ИПД посвящено значительно меньше работ [7–9]. Экспериментальные результаты о текстуре материалов после ВЭ практически отсутствуют, хотя это весьма перспективный метод получения объемных УМЗ-материалов. Эти данные и их анализ могли бы способствовать лучшему пониманию процессов текстурообразования при ВЭ.

Цель данной работы заключается в исследовании текстуры сплава титана ВТ1-0 после ВЭ.

Материал и методика эксперимента

Исходным материалом послужила цилиндрическая заготовка сплава титана ВТ1-0 с гексагональной плотноупакованной решеткой после горячей прокатки. Заготовку сплава помещали в матрицу с винтовым каналом (с параметрами: $\beta_{\max} = 60^\circ$, $h = 50 \text{ mm}$), сечение которого, ортогональное оси прессования, постоянно вдоль этой оси. Угол наклона γ винтовой линии к оси прессования изменяется по высоте h матрицы, причем на ее начальном и конечном участках он равен нулю. Указанные особенности геометрии канала приводят к тому, что при выдавливании через него форма заготовки не изменяется. Это позволяет осуществлять ее многократное прессование с целью накопления больших деформаций (рис. 1). Винтовую экструзию осуществляли в установке для теплой механической экструзии. Установка была смонтирована на прессе 250 t.

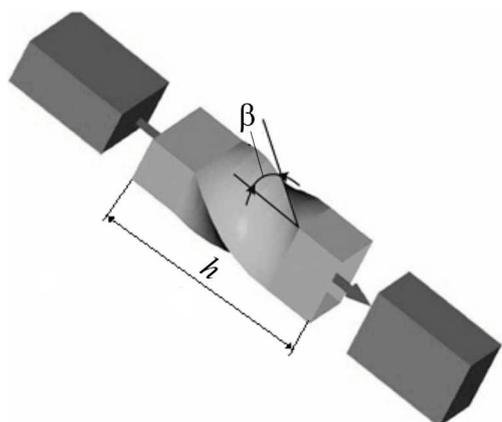


Рис. 1. Схема обработки винтовой экструзией

Подробное описание установки приведено в монографии [2]. Обработку вышеуказанного материала проводили при таких параметрах: температура нагрева контейнера и матрицы 623 K; скорость деформирования 3 mm/s; скорость деформации $0.2\text{--}1 \text{ s}^{-1}$; давление ВЭ 220 МПа. Размеры заготовки: сечение $18 \times 28 \text{ mm}$, длина 100 mm. Было проведено 4 прохода.

Кристаллографическую текстуру металла исследовали рентгеновским методом с построением обратных полюсных фигур (ОПФ) [10,11]. Из ис-

ходных и экструдированных материалов вырезали образцы для текстурных исследований перпендикулярно оси экструзии. Вырезанные полоски химически полировали на глубину 0.2 мм для снятия искажений, внесенных механической обработкой при вырезке. На дифрактометре ДРОН-3 проводили сканирование по углам $\theta-2\theta$ в K_α -излучении молибдена. Записывали дифрактограммы 15 линий исходного, экструдированного, а также образца без текстуры, который приготовили из мелких опилок исследуемого материала после 2-часового вакуумного отжига при температуре 450°C. Определяли интегральные интенсивности вышеуказанных дифракционных линий образцов и эталона, по соответствующей методике находили полюсные плотности ОПФ [10,11].

Результаты и обсуждение

Структура сплава в исходном состоянии характеризовалась крупными зернами, размер которых составил приблизительно 1–2 мм (рис. 2,*а*). После ВЭ зерна значительно измельчились (~ 100 нм), видны вихреобразные следы деформации (рис. 2,*б*).

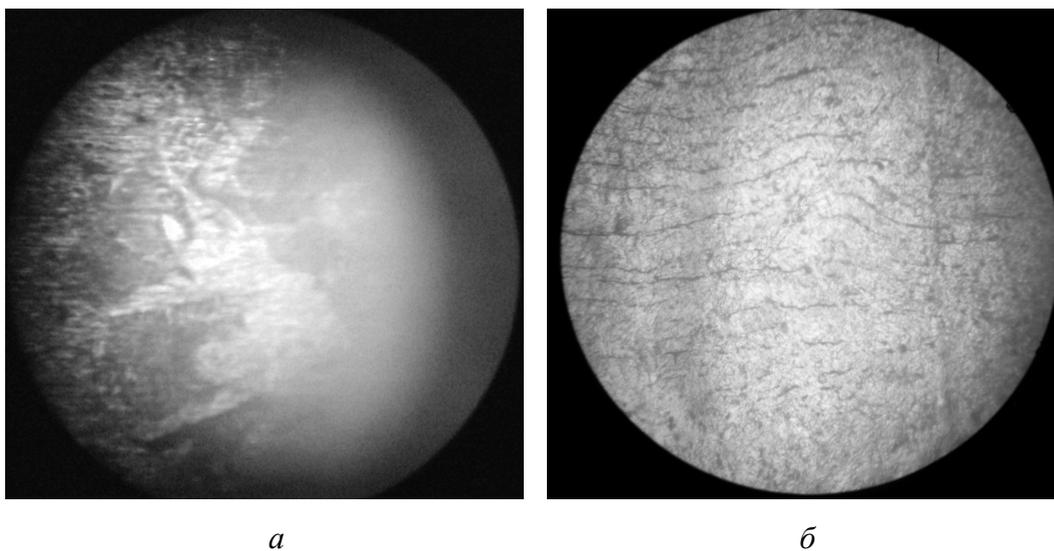


Рис. 2. Структура BT1-0 в исходном состоянии (*а*) и после 4 проходов ВЭ (*б*). Увеличение $\times 600$, при фотографировании увеличено в 2 раза

Экспериментальные ОПФ представлены на рис. 3. Из рис. 3,*а* видно, что перед началом обработки при помощи ВЭ с осью образца совпадали оси кристаллитов, которые расположены в широкой области повышенной полюсной плотности, ограниченной основными ориентировками $\langle 20\bar{2}1 \rangle / 3.59$, $\langle 11\bar{2}2 \rangle / 2.75$, $\langle 20\bar{2}3 \rangle / 1.84$, $\langle 10\bar{1}1 \rangle / 1.13$, а также около $\langle 11\bar{2}0 \rangle / 1.57$ (рядом с ориентацией указана соответствующая полюсная плотность на ОПФ). После ВЭ кристаллографическая ориентация кристаллитов сплава существенно изменилась (рис. 3,*б*). Повышенная полюсная плотность занимает веерообразные области вблизи ориентаций $\langle 20\bar{2}1 \rangle / 1.18$, $\langle 21\bar{3}1 \rangle / 1.34$, $\langle 11\bar{2}0 \rangle / 1.11$,

$\langle 2\bar{1}\bar{3}0 \rangle / 1.29$, а также вблизи $\langle 20\bar{2}\bar{3} \rangle / 1.23$, $\langle 11\bar{2}4 \rangle / 1.13$, $\langle 10\bar{1}4 \rangle / 1.25$, $\langle 10\bar{1}3 \rangle / 0.96$, $\langle 10\bar{1}2 \rangle / 0.83$. Видно, что в целом распределение полюсной плотности стало более равномерным.

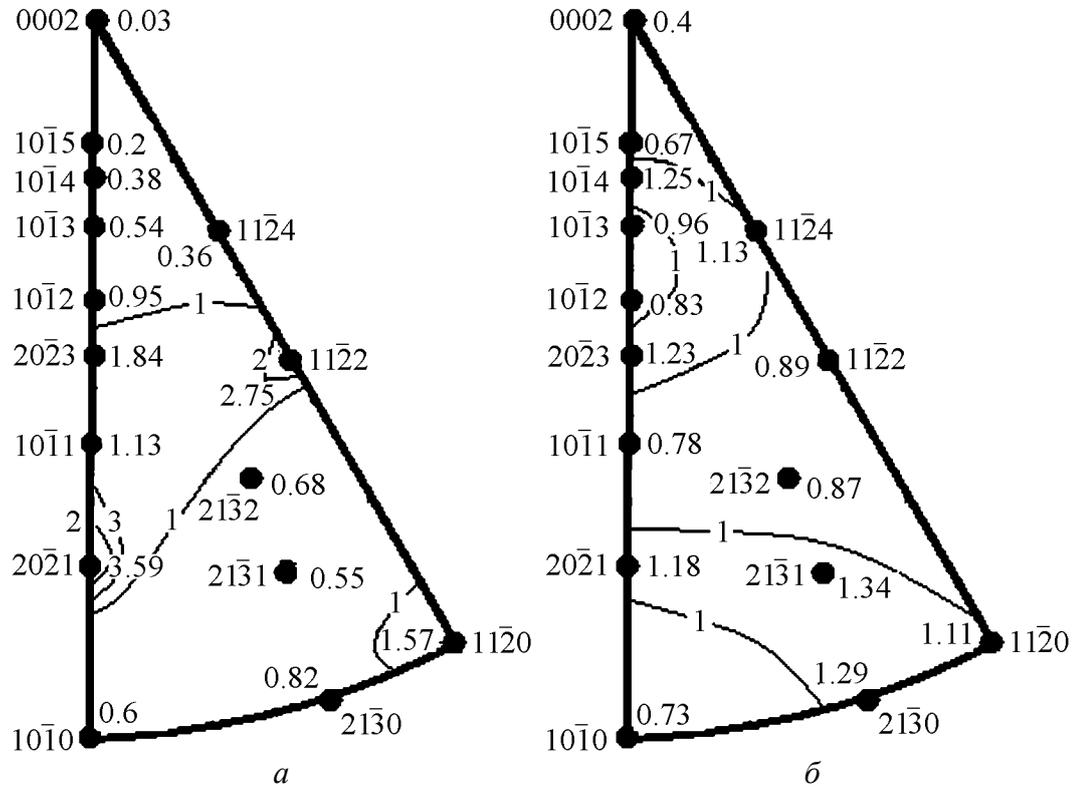


Рис. 3. Экспериментальные ОПФ сплава VT1-0: *a* – исходный образец, *b* – после ВЭ (перпендикулярно оси экструзии)

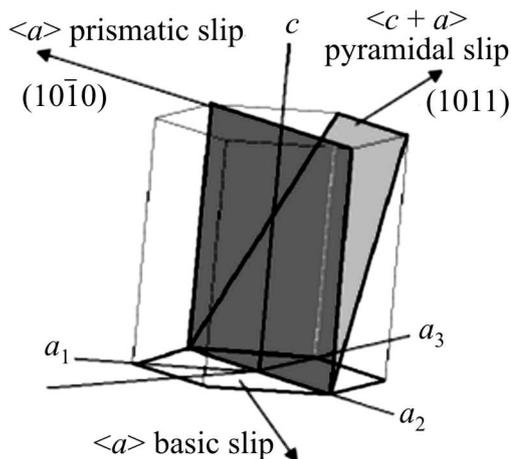


Рис. 4. Основные системы скольжения титана

Аналогичные ориентации кристаллов были обнаружены авторами [7] при РКУП, когда заготовка поворачивается на 90° (выполненном вплоть до 4-го прохода при температуре 723 К). С помощью компьютерного моделирования было показано, что текстурообразование в Ti может быть объяснено активизацией базисных $\{0001\}$ $\langle 1\bar{1}20 \rangle$, призматических $\{10\bar{1}0\}$ $\langle 1210 \rangle$, пирамидальных первого рода $\{1011\}$ $\langle 1\bar{1}23 \rangle$ систем скольжения (рис. 4) и двойникования сжатия $\{2\bar{1}\bar{1}2\}$ $\langle 2\bar{1}\bar{1}3 \rangle$.

При этом увеличение числа проходов может приводить к усилению вклада базисных и призматических систем скольжения, а также к незначительному ослаблению вклада пирамидальных систем скольжения (первого рода).

В то же время в работе [8] показано, что при РКУП Ti развивается аксиальная текстура, которая может быть описана ориентациями типа $\{101\}\langle hkl\rangle$, не обнаруженными в [7].

Схемы деформации при РКУП и ВЭ, очевидно, отличаются. Однако возникновение аналогичных ориентаций кристаллов при ВЭ и РКУП свидетельствует, по нашему мнению, о проявлении аналогичных механизмов пластической деформации при указанных выше способах пластической обработки металла. Вместе с тем наблюдающийся веерообразный (рис. 2,б) разброс исходных ориентаций кристаллов после ВЭ (рис. 3,б) наводит на мысль о том, что при формировании кристаллографических ориентаций в процессе ВЭ значительную роль играет некристаллографический механизм деформации, вызванный вихревым движением фрагментов измельчающихся зерен, в определенной степени подобный турбулентному течению жидкости [12].

Выводы

1. Текстура цилиндрической заготовки титана перед ВЭ характеризуется расположением параллельно ее осей ориентаций, лежащих в области повышенной полюсной плотности, ограниченной основными ориентировками $\langle 20\bar{2}1\rangle/3.59$, $\langle 11\bar{2}2\rangle/2.75$, $\langle 20\bar{2}3\rangle/1.84$, $\langle 10\bar{1}1\rangle/1.13$, а также около $\langle 11\bar{2}0\rangle/1.57$.

2. После ВЭ распределение полюсной плотности более равномерное. Кристаллографическая ориентация кристаллитов занимает веерообразные области вблизи ориентаций $\langle 20\bar{2}1\rangle/1.18$, $\langle 21\bar{3}1\rangle/1.34$, $\langle 11\bar{2}0\rangle/1.11$, $\langle 21\bar{3}0\rangle/1.29$, а также вблизи $\langle 20\bar{2}3\rangle/1.23$, $\langle 11\bar{2}4\rangle/1.13$, $\langle 10\bar{1}4\rangle/1.25$, $\langle 10\bar{1}3\rangle/0.96$, $\langle 10\bar{1}2\rangle/0.83$.

3. Текстурообразование в процессе ВЭ в Ti может быть обусловлено не только действием базисных $\{0001\}$ $\langle 1\bar{1}20\rangle$, призматических $\{10\bar{1}0\}$ $\langle 1210\rangle$, пирамидальных первого рода $\{1011\}$ $\langle 1\bar{1}23\rangle$ систем скольжения и двойникования сжатия $\{2\bar{1}\bar{1}2\}$ $\langle 2\bar{1}\bar{1}3\rangle$, но и вихревым движением фрагментов измельчающихся зерен, в определенной степени подобным турбулентному течению жидкости.

1. R.Z. Valiev, Yu. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, and Yu.T. Zhu, JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society **58**, No. 4, 33 (2006).
2. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, Винтовая экструзия – процесс накопления деформации, ТЕАН, Донецк (2003).
3. R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov, Mater. Sci. Eng. **A168**, 141 (1993).

4. *X. Sauvage, A. Chbihi, X. Queleuenc*, J. Phys.: Conference Series **240**, 012003 (2010).
5. *Ya. Y. Beygelzimer, D. V. Orlov*, Defect and Diffusion Forum **208–209**, 311 (2002).
6. *Р. Хоникомб*, Пластическая деформация металлов, Изд-во иностр. лит., Москва (1962).
7. *И.В. Александров, В.Д. Ситдииков, Я.Т. Бонарски*, Вестник УГАТУ **12**, № 2, 76 (2009).
8. *I. Alexandrov, J. Bonarski, L. Tarkowski, V. Sitdicov*, Archives of metallurgy and materials **53**, No. 1, 237 (2008).
9. *M. Salari, J. Kazemi*, NANOCON 2010, 12–14 Oct. 2010, Olomouz, Czech Republic, EU.
10. *М.М. Бородкина, Э.Н. Спектор*, Рентгенографический анализ текстуры в металлах и сплавах, Металлургия, Москва (1982).
11. *С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков*, Рентгенографический и электронно-оптический анализ, Металлургия, Москва.
12. *Я.Е. Бейгельзимер*, ФТВД **18**, № 4, 77 (2008).

В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк, П.А. Брюханов, Я.Ю. Бейгельзимер

ТЕКСТУРА ТИТАНУ ПІСЛЯ ГВИНТОВОЇ ЕКСТРУЗІЇ

Досліджено кристалографічну текстуру сплаву титана VT1-0 після гвинтової екструзії (ГЕ). Показано, що формування текстури в процесі ГЕ може бути обумовлено не тільки дією базисного, призматичного, пірамідального ковзання і двійникування, але й вихровим рухом фрагментів зерен, що подрібнюються, подібним до турбулентної течії рідини.

Ключові слова: текстура, титан, гвинтова екструзія, інтенсивна пластична деформація

V. V. Usov, N. M. Shkatulyak, P. A. Bryukhanov, Ya. Ye. Beygelzimer

TITANIUM TEXTURE FORMED BY TWIST EXTRUSION

Crystallographic texture of titanium alloy VT1-0 is explored after the twist extrusion (TE). It is shown that forming of the texture in the process of TE can be caused not only by the action of the basal, prismatic, pyramidal sliding and twinning but also by swirling motion of fragments of granulated grains (similar to the turbulent flow of liquid).

Keywords: texture, titanium, twist extrusion, severe plastic deformation

Fig. 1. Scheme of twist extrusion

Fig. 2. The structure of the VT1-0 in the initial state (*a*) and after TE (4 passes) (*b*). Magnification $\times 600$, with photographs increased 2-fold

Fig. 3. Experimental inverse pole figures of VT1-0: *a* – initial sample, *b* – after the twist extrusion (perpendicular to the axis of extrusion)

Fig. 4. The main slip systems of titanium