

05

## Распространение локализованной полосы деформации кручением в наноструктурированном титане

© М.Б. Иванов, А.В. Пенкин, Ю.Р. Колобов

Белгородский государственный национальный исследовательский  
университет  
E-mail: Ivanov.Maxim@bsu.edu.ru

В окончательной редакции 8 августа 2014 г.

Представлены первые результаты исследований обнаруженного авторами эффекта распространения локализованных полос пластической деформации при кручении цилиндрических образцов наноструктурированного технически чистого титана марки VT1-0.

В настоящей работе исследованы особенности развития пластической деформации кручением при комнатной температуре цилиндрических образцов наноструктурированного технически чистого титана VT1-0 (получен сочетанием продольной и поперечно-винтовой прокатки [1], элементный состав приведен в таблице) и обнаруженного авторами эффекта, заключающегося в распространении вдоль образца большой пластической деформации в виде локализованной полосы сдвига. Подробно изученная в [1,2] микроструктура исследуемого сплава представляет зеренно-субзеренную смесь, характеризующуюся средним размером элементов микроструктуры порядка 220 nm с коэффициентом неравноосности (отношение ширины зерен к их длине при измерении на плоском шлифе) порядка 0.35. Доля большеугловых границ в спектре распределения границ элементов микроструктуры составляла порядка 78%.

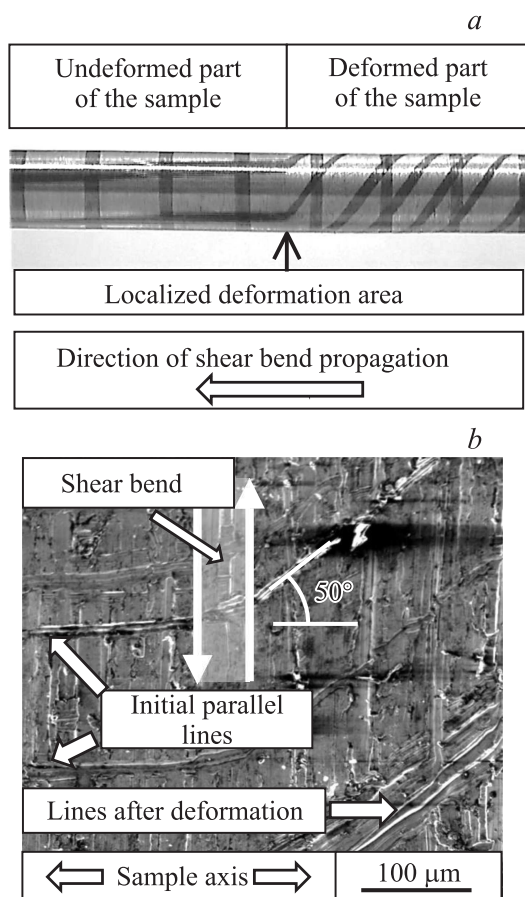
Исследовали образцы в форме прутка диаметром 6 mm и длиной 200 mm. На поверхность образца наносили линии, параллельные его оси. Один конец образца зажимали во вращающемся шпинделе токарного станка, другой фиксировали в неподвижной опоре. Вращением шпинделя закручивали образец с различными угловыми скоростями в диапазоне 25–250 rpm (2.6–26 rad/s).

Элементный состав технически чистого титана марки BT1-0

|       | Содержание элементов, wt.%, Ti-основа |      |       |       |       |       |        |
|-------|---------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
|       | Al                                    | Fe   | Si    | O2    | C     | N2    | H2     |
| BT1-0 | 0.01                                  | 0.12 | 0.002 | 0.143 | 0.004 | 0.003 | 0.0008 |

Исследования микроструктуры проводили методами растровой (РЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии на приборах FEI Quanta 200 3D и Tecnai G2 F20 S-TWIN соответственно. Образцы для исследований микротвердости, РЭМ и ПЭМ вырезали на электро-эрозионном станке. После предварительного механического утонения до толщины порядка 0.1–0.2 mm (с завершением процесса на тонкой наждачной бумаге зернистостью 1000) тонкие фольги для ПЭМ получали методом струйной полировки на установке TenuPol-5. Состав электролита: 20% HClO<sub>4</sub> + 80% CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>H. Микротвердость измеряли на микротвердомере DM-8 AFFRI при нагрузке 100 g.

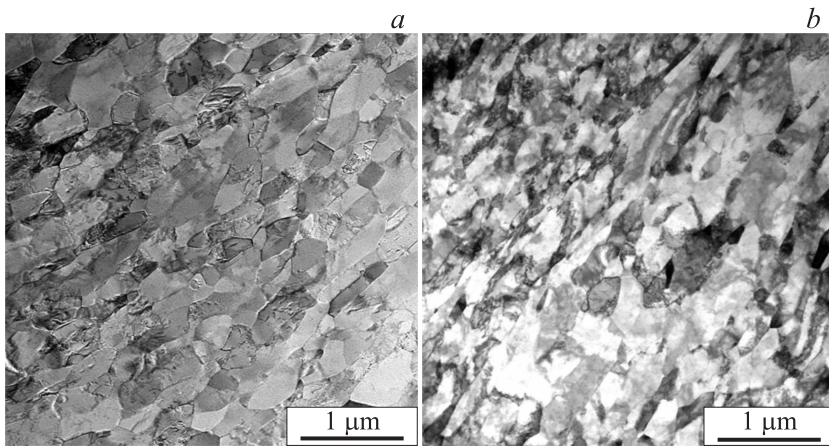
Было обнаружено, что вместо обычно наблюдаемых в крупнокристаллических металлических материалах квазиравномерной деформации кручением вдоль всего образца или локализации в одном или нескольких местах деформации до разрушения наблюдается необычное явление: распространение узкой локализованной полосы деформации кручением вдоль образца, которое можно наблюдать невооруженным глазом. Первоначально в некотором случайном месте образца формируется зона локального пластического течения кручением в виде полосы шириной около одного диаметра образца. После формирования данная зона начинает перемещаться вдоль цилиндрического образца, одновременно сжимаясь до ширины менее миллиметра. Данная полоса распространяется со скоростью порядка нескольких миллиметров в секунду в одном из направлений вдоль оси образца. При этом вне полосы скорость деформации кручением практически равна нулю как до, так и после прохождения полосы. Процесс протекает аналогично развитию полосы Людерса–Чернова, однако имеет и существенные отличия. На рис. 1 приведено изображение цилиндрического образца после остановки в процессе испытаний. Наблюдаемые изменения формы продольных рисок наглядно демонстрируют описанные выше особенности развития пластической деформации: половина образца осталась недеформированной, другая половина скручена на угол винтовой линии



**Рис. 1.** Изображение образца после остановки вращения: *a* — внешний вид, *b* — растровая электронная микроскопия поверхности в полосе деформации (увеличенная центральная часть рисунка *b*).

порядка 50°. Зона между деформированной и недеформированной частями представляет собой диск (полоса, или зона деформации), толщина которого неразличима невооруженным взглядом.

7\* Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 23



**Рис. 2.** Изображения микроструктуры наноструктурированного титана до (*a*) и после (*b*) прохождения волны кручения. Просвечивающая сканирующая электронная микроскопия.

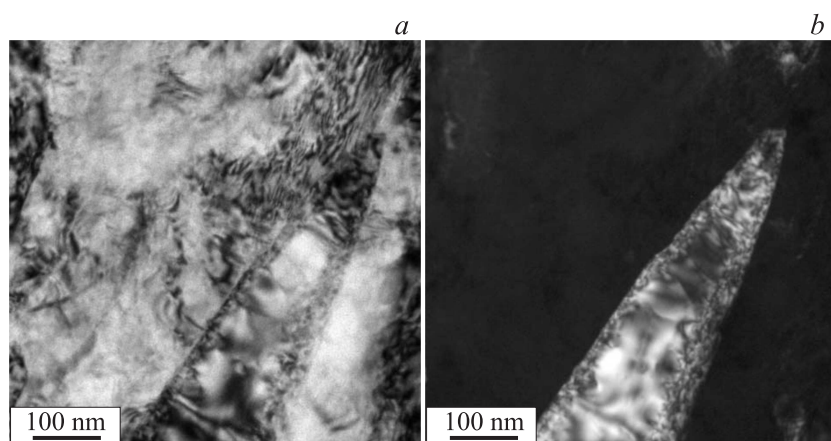
Величину истинной деформации на поверхности можно определить по известной формуле:

$$e = \operatorname{tg} \gamma = \pi d / l,$$

где  $\gamma$  — угол подъема винтовой линии, измеренный с помощью рисок, нанесенных на поверхность прутка,  $d$  — диаметр образца,  $l$  — шаг одного витка линии, изначально нанесенной вдоль оси образца. Скорость деформации в рассматриваемом случае оценивали по известной формуле:

$$\dot{\epsilon} = eV/h = ed\pi/(2h \operatorname{tg} \gamma),$$

где  $V$  — линейная скорость перемещения волны,  $\omega$  (rad/s) — угловая скорость деформации,  $h$  — ширина полосы локализованной деформации. При выбранных в качестве примера условиях:  $\omega = 25$  rpm,  $d = 6$  mm, угол  $\gamma$  составил порядка  $50^\circ$ , а скорость перемещения волны — 6.6 mm/s. Проведенные оценки накопленной истинной логарифмической деформации сдвига на поверхности образца показали, что ее величина составляет порядка  $e \sim 1.2$ . Усредненная деформация



**Рис. 3.** Микроструктура наноструктурированного титана после прохождения волны кручения: *a* — светлопольное и *b* — темнопольное изображение. Просвечивающая электронная микроскопия.

по сечению образца  $e_{av} = (2/3)e$  составляет величину порядка 0.8. При наблюдаемой ширине полосы деформации (по данным РЭМ на рис. 1, *b*) не более  $10 \mu\text{m}$  скорость деформации вблизи поверхности в локализованной полосе достигала порядка  $8 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ . Обнаруженные скорости деформации и ширина полосы совпадают с известными характеристиками адиабатических полос локализованной деформации, характерных для металлических материалов на стадии развитой пластической деформации.

Исходная структура исследованных образцов после сдвиговой деформации в полосе испытывает существенные изменения. Исходные зерна вытягиваются в направлении сдвига, в объеме зерен значительно повышается плотность дислокаций (рис. 2). После прохождения полосы сдвига границы зерен становятся существенно неравновесными: вблизи них формируются дальнедействующие поля напряжений, связанные с высокой плотностью дислокаций внутри зерен и, по-видимому, внесенных зернограницных дислокаций (рис. 3).

Измерения микротвердости показали, что в результате деформации в указанном режиме практически не происходит упрочнение наноструктурированного титана за фронтом полосы сдвига. Так, если исходная

микротвердость составляла 275 HV, то после прохождения сдвиговой волны деформации (в объеме образца со степенью деформации  $e = 0.6$ ) она составила 290 HV, т.е. практически не изменяется в пределах погрешности измерений.

При возрастании скорости вращения от 25 до 250 rpm накопленная деформация в полосе сдвига увеличивается с 1.2 до 1.7 (увеличение угла с 50 до 60°). При этом более чем в 5 раз увеличивается скорость распространения волны.

В процессе распространения волны пластической деформации наблюдается разогрев образца. Упрощенный расчет теплового эффекта может быть получен с использованием выражения [3]

$$Ve\sigma_{flow} = \rho C_p \Delta T,$$

где  $\rho = 4.5 \text{ g/m}^3$  — плотность титана,  $C_p = 0.523 \text{ J/g} \cdot \text{K}$  — теплоемкость титана,  $\beta$  — коэффициент, примерно равный 0.9. Предполагая, что напряжения течения  $\sigma$  в адиабатической полосе соответствуют пределу текучести при кручении наноструктурированного титана 465 МПа [1] (большие напряжения течения, очевидно, существовать не могут, поскольку образец не испытывает деформации в объеме, отличном от полосы сдвига), усредненный разогрев образца должен составлять около 168 К. Однако деформация в поверхностных слоях выше средней, что должно приводить к большему разогреву (около 250 К) даже в условиях излучения с поверхности и отвода тепла в объем образца. Несмотря на незначительный разогрев, резкое охлаждение образца в процессе деформации (водой) приводит к „закалке“ полосы деформации — она зарождается и продолжает распространение в другом месте.

Необходимо подчеркнуть, что все вышесказанное относится только к наноструктурированному состоянию металлического материала (в рассматриваемом случае — титана), для которого характерны большая протяженность и неравновесное состояние границ зерен. В таком состоянии экспериментально установлено значительное повышение коэффициентов диффузии по границам зерен [4]. В процессе деформации массоперенос ускоряется еще на порядки величины. В серии экспериментов нами было установлено: вышеописанный процесс деформации кручением не наблюдается в крупнозернистом, в том числе холоднодеформированном титане, а также его сплавах (VT6, VT16) в различных структурных состояниях. Кроме того, указанный процесс не реализуется также и в наноструктурированном титане с сильно

неравноосными зернами. Средняя степень накопленной деформации в образце в результате прохождения фронта кручения ( $e \sim 0.8-1.2$ ) соответствует степени деформации при РКУП и винтовой экструзии [5], а в приповерхностных слоях образца значительно превышает указанные значения. Можно утверждать, что обнаружена возможность реализации большой (интенсивной) пластической деформации кручением длинномерных изделий без использования прессформы.

Таким образом, впервые обнаружен неизвестный ранее эффект распространения самоподдерживающейся полосы большой сдвиговой ( $e \sim 1$ ) пластической деформации при кручении наноструктурированного технически чистого титана со скоростью сдвиговой деформации в полосе, достигающей  $0.8 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ . Установлено, что эффект имеет признаки адиабатического развития пластической деформации в локализованной полосе сдвига, ширина которой составляет несколько десятков микрометров. Установлено, что обнаруженный эффект в диапазоне скоростей деформации кручением 2.6–26 rad/s не проявляется в крупнозернистом состоянии технически чистого титана и в промышленных сплавах титана, в том числе в холодно-деформированном состоянии, а также подавлен в наноструктурированном титане с сильно неравноосными зернами.

Авторы выражают признательность С.С. Манохину за проведение электронно-микроскопических исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 2014/420 Минобрнауки РФ при финансовой поддержке контракта Минобрнауки РФ № 02.G25.31.0103, а также РФФИ № 13-02-01107.

## Список литературы

- [1] *Ivanov M.B., Kolobov Yu.R., Golosov E.V., Kuz'menko I.N., Veinov V.P., Nechaenko D.A., Kungurtsev E.S.* // *Nanotechnologies in Russia*. 2011. V. 6. P. 370–378.
- [2] *Kolobov Yu.R.* // *Nanotechnologies in Russia*. 2009. V. 4. N 11–12. P. 758–775.
- [3] *Yang D., An Y., Cizek P., Hodgson P.* // *Materials Science and Engineering*. A. 2011. V. 528. P. 3990–3997.
- [4] *Kolobov Yu.R., Grabovetskaya G.P., Ivanov M.B., Zhilyaev A.P., Valiev R.Z.* // *Scripta Materialia*. 2001. V. 44. P. 873–878.
- [5] *Estrin Y., Vinogradov A.* // *Acta Materialia*. 2013. V. 61. P. 782–817.