

05

Экспериментальное исследование закономерностей диссипации энергии при динамическом деформировании нанокристаллического титана

© О. Плехов, В. Чудинов, В. Леонтьев, О. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
Институт физики перспективных материалов УГАТУ, Уфа
E-mail: roa@icmm.ru

В окончательной редакции 22 июля 2008 г.

Экспериментально исследуются механические и термодинамические характеристики нанокристаллического титана при динамическом сжатии со скоростями деформации $2-5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. Образцы нанокристаллического титана изготовлены из прутка, полученного методом равноканального углового прессования, с характерным размером зерна 300 нм. Установлено, что увеличение на 25% динамического предела упругости в нанокристаллическом титане сопровождается качественными изменениями процесса поглощения и диссипации энергии в материале. Величина диссипированной энергии остается примерно постоянной и не зависит от скорости и амплитуды нагружения в исследованном диапазоне скоростей деформации.

PACS: 81.07.bc

В работе исследованы образцы титана Grade 2 в исходном крупнозернистом состоянии с характерным размером зерна $25 \mu\text{m}$ и нанокристаллическом, полученном методом равноканального углового прессования [1], с характерным размером зерна $0.30 \mu\text{m}$. Измельчение зерна материала на два порядка приводит к существенному повышению его механических характеристик (предела прочности и предела пропорциональности). При этом материал охрупчивается, что проявляется в уменьшении величины остаточной деформации и характера разрушения. Сравнение механических характеристик крупнозернистого и нанокристаллического титана при квазистатическом растяжении представлено в работе [2]. В квазикристаллических условиях предел пропорциональности титана увеличивается в 2.6 раза при измельчении зерна. В данной

работе проведено исследование изменения механических и термодинамических характеристик материала при динамическом деформировании. Динамические испытания на сжатие были выполнены на установке РСГ-25, реализующей традиционный метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона диаметром 25 мм. Установка состоит из газовой пушки калибром 18 мм, разгоняющей ударник длиной 200 мм. Скорость ударника в экспериментах варьировалась от 15 до 30 м/с, что обеспечивало скорость деформации образца от 2 до $5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. Соотношение размеров разрезного стержня Гопкинсона 1:3, соответственно входного и выходного, обеспечивало нагружение образца несколькими последовательными импульсами сжатия, что позволяло достичь больших энергий деформирования.

Исследуемые образцы титана имели форму цилиндров диаметром 7.6 мм и длиной 3–4 мм. Для записи поля температур использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M. Основные технические характеристики камеры: чувствительность не менее 25 мК при 300 К, спектральный диапазон 3–5 мкм, максимальный размер кадра 320×240 точек. Запись поля температуры проводилась с частотой 3200 Hz и минимальным пространственным разрешением $2 \cdot 10^{-4}$ м. Калибровка камеры проводилась на образце, температура которого задавалась нагревательным элементом и регистрировалась цифровым термометром с гарантированной точностью до 1 градуса.

Динамические характеристики титана определялись на основе анализа отраженного и прошедшего импульсов с учетом конечной величины деформации образца [3]. Полученные деформационные кривые представлены на рис. 1, на котором видны качественные отличия механического поведения материала в зависимости от характерного размера зерна. С измельчением зерна динамический предел пропорциональности титана увеличился на 25%, зависимость напряжения от деформации имеет ярко выраженный участок упрочнения. При этом нанокристаллический титан становится значительно более хрупким и при скорости ударника 30 м/с (максимальное напряжение 1.5 GPa) образец разрушается, в отличие от крупнозернистого титана, продолжающего гомогенно деформироваться при тех же условиях нагружения. При переходе от статического к динамическому нагружению крупнозернистый титан демонстрирует существенный рост значений механических характеристик. Аналогичное поведение наблюдалось при исследовании скорости диссипации энергии в крупнозернистом альфа-

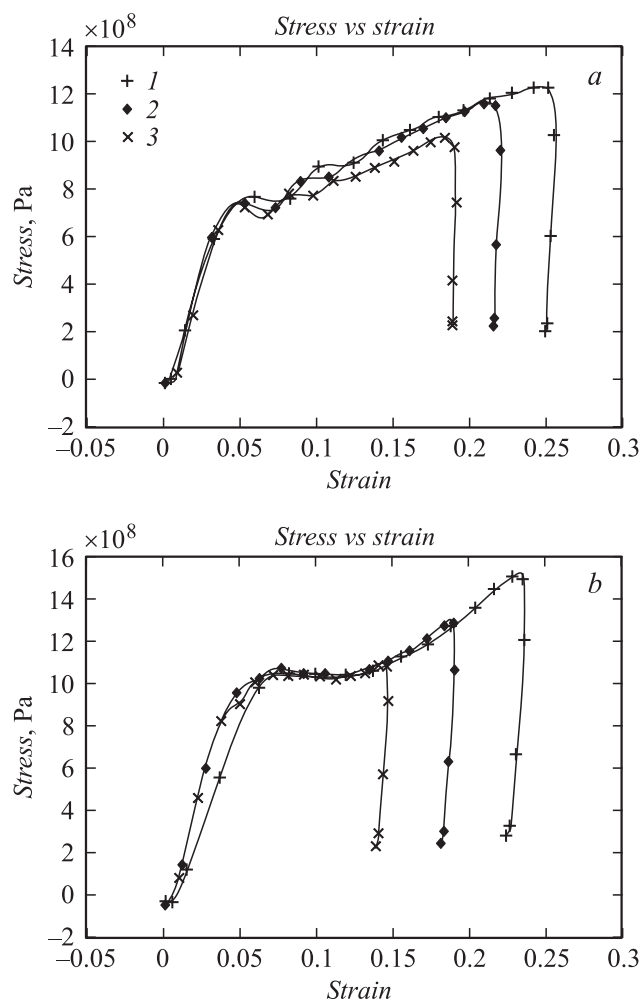


Рис. 1. Деформационные кривые для крупнозернистого (а) и нанокристаллического титана (b) при различных скоростях деформации (1 — 4600 s^{-1} для крупнозернистого титана и 4400 s^{-1} для нанотитана; 2 — 3800 s^{-1} для крупнозернистого титана и 3400 s^{-1} для нанотитана; 3 — 3100 s^{-1} для крупнозернистого титана и 2500 s^{-1} для нанотитана).

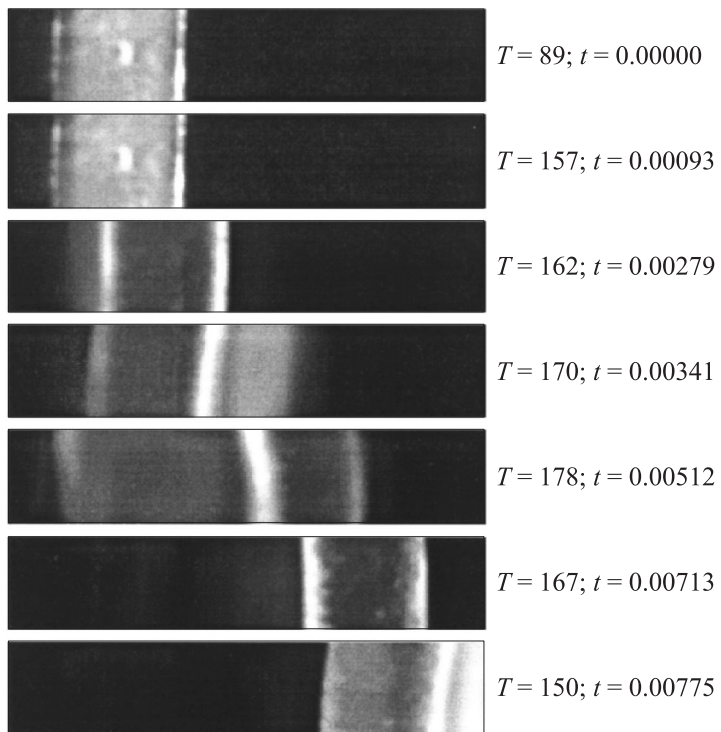


Рис. 2. Процесс динамического деформирования и регистрация температуры на поверхности образца при скорости деформации 4200 s^{-1} (T — температура, $^{\circ}\text{C}$, t — время, s).

титане [4]. Нанокристаллический титан демонстрирует значительно большую устойчивость механических характеристик при изменении скорости деформации.

На рис. 2 представлена типичная термограмма динамического деформирования титанового образца. На рис. 3 представлены зависимости средней температуры от времени для двух образцов крупнозернистого (sp. 1 и sp. 2) и двух образцов нанокристаллического титана (sp. 3 и sp. 4) при скорости ударника 25 m/s . Средняя температура нанокристаллических образцов при всех исследованных интенсивностях

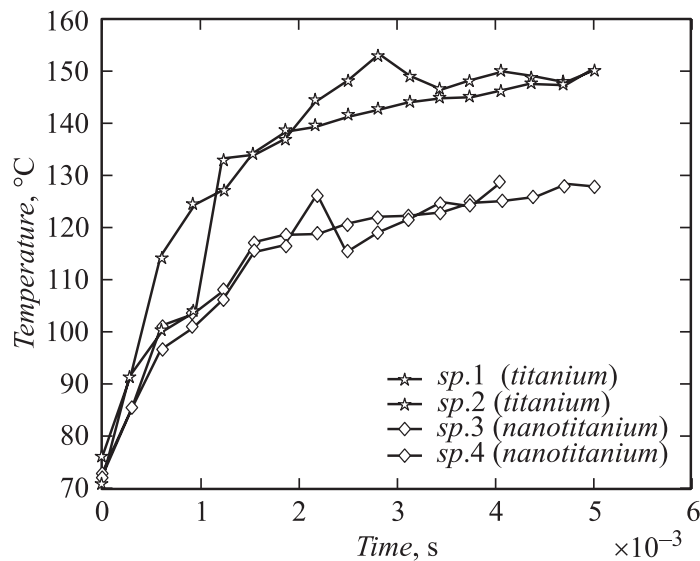


Рис. 3. Зависимость средней температуры образцов титана и нанотитана при скорости ударника 25 м/с (скорость деформации 4200–4400 с⁻¹).

воздействий была меньше, чем крупнозернистых аналогов. При скорости ударника 17 м/с разница в температуре составляла 1–3 градуса, при скорости 25 м/с — 20 градусов. Единственное отклонение от данной закономерности наблюдалось при разрушении нанокристаллического титана, максимальная температура нанокристаллического образца в этом случае достигала 250 градусов, что на 10 градусов больше, чем температура крупнозернистого титана при тех же условиях.

Наиболее содержательным с точки зрения анализа влияния микроструктуры материала является определение доли диссипированной и запасенной энергии в процессе деформирования. Данный анализ позволяет определить влияние зеренной структуры материала на ее способность к поглощению и диссипации приложенной энергии. При приближении к моменту разрушения скорость накопления энергии в материале обычно значительно уменьшается. Энергия, затраченная на

деформирование образца, может быть рассчитана по формуле

$$E_1 = V_0 \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma_{sp} d\varepsilon_{sp},$$

где V_0 — объем образца, σ_{sp} — напряжение в образце, $\varepsilon_{sp} = \ln\left(\frac{d_0}{d_1}\right)$ — мера деформации образца, d_0 и d_1 — начальная и конечная длина образца соответственно.

Энергия, преобразованная в тепло в результате деформирования, определяется

$$E_2 = c\rho V_0 \Delta T,$$

где c — удельная теплоемкость, ρ — плотность, ΔT — изменение температуры.

На каждый образец в процессе деформирования воздействовало три импульса сжатия. Энергия, затраченная на деформирование образца, рассчитывалась по всем импульсам, действующим на образец. В экспериментах наблюдались следующие характерные последовательности импульсов сжатия, соответствующие энергиям; 20.8, 6.8, 0.5 J при скорости ударника 17 m/s; 45.4 J, 25.8 J, 2.1 J при скорости ударника 28 m/s. Для расчета величины диссипированной энергии использовалась средняя температура части образца, попадающей в поле зрения камеры. При больших скоростях деформирования ($> 5000 \text{ s}^{-1}$) оптическая схема изменялась с целью обеспечения безопасности сканирующего оборудования, что приводило к ухудшению пространственного разрешения поля температуры на поверхности образца. В результате расчеты доли диссипированной энергии при скорости деформирования более 5000 s^{-1} проводились по максимальной температуре на поверхности образца, что может приводить к ее завышенным оценкам. Результаты расчетов доли диссипированной энергии (E_2/E_1) представлены на рис. 4. Анализ приведенных данных показывает, что удельная доля диссипированной энергии в нанокристаллическом состоянии не меняется при всех исследованных амплитудах напряжений и скоростях деформаций, за исключением интенсивностей нагружения, приводящих к разрушению материала. В крупнозернистом титане доля диссипированной энергии растет с 0.58 до 0.86 при увеличении скорости деформации. По-видимому, измельчение зерна приводит к созданию в материале нового механизма диссипации энергии, работающего одинаково эффективно

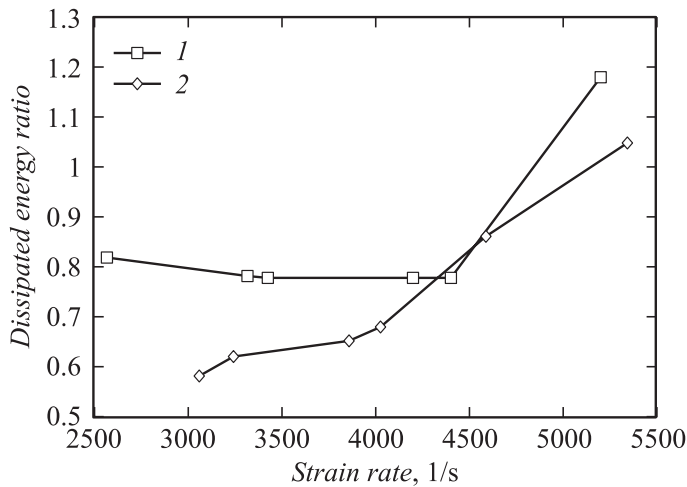


Рис. 4. Доля диссипированной энергии в крупнозернистом (1) и нанокристаллическом титане (2) в зависимости от скорости деформирования.

при различных скоростях деформации и интенсивностях воздействий. Аналогичные результаты качественного различия механизма диссипации энергии и разрушения для крупнозернистого и нанокристаллического титана были получены при исследовании особенностей диссипации энергии при циклическом деформировании [2]. В [2] было показано, что рост средней температуры нанокристаллического образца и, следовательно, интегральной мощности источников тепла, вызванных эволюцией структуры материала, прямо пропорционален энергии (квадрату амплитуды напряжений), затрачиваемой на деформирование образца при циклическом деформировании для всех исследованных значений приложенного напряжения. Результаты обоих циклов экспериментальных исследований свидетельствуют о способности нанокристаллического материала более эффективно задействовать структурный (конфигурационный) канал поглощения энергии при его деформировании, вовлекая в этот процесс весь деформируемый объем. Этим же объясняется „квазихрупкий“ характер разрушения нанокристаллических материалов, происходящий вследствие формирования локального связанного кластера зернограничных дефектов.

Авторы работы выражают признательность Р.З. Валиеву и И.П. Семёновой за предоставленный материал для испытаний.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (05-08-33652, 08-01-00699, 07-01-96004).

Список литературы

- [1] *Latysh V., Semenova I., Salimgareeva G., Kandarov I., Zhu Y., Lowe T., Valiev R.* // Mater. Sci. Forum. 2006. V. 503–504. P. 763–768.
- [2] *Плехов О., Наймарк О., Валиев Р., Семенова И., Saintier N., Palin-Luc T.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 13. С. 33.
- [3] *Брагов А.М., Родионов С.Н., Русин Е.Е.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 21. С. 10–14.
- [4] *Hodowany J., Ravichandran G., Rosakis A.J., Rosakis P.* Partition of plastic work into heat and stored energy in metals Experimental mechanics. 2000. V. 40. N 2. P. 113–120.