

05;07

Экспериментальное исследование аномалий поглощения энергии в нанокристаллическом титане при циклическом нагружении

© О. Плехов, О. Наймарк, Р. Валиев,
И. Семенова, N. Saintier, T. Palin-Luc

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
Институт физики перспективных материалов УГАТУ, Уфа
E.N.S.A.M. Laboratoire Matériaux Endommagement Fiabilité
et Ingénierie des Procédés
(LAMEFIP), EA 2727, Esplanade des Arts et Métiers,
33405 Talence Cedex, France
E-mail: poa@icmm.ru

В окончательной редакции 24 января 2008 г.

Методами инфракрасного сканирования исследуются закономерности поглощения и диссипации энергии при многоцикловом нагружении объемного наноструктурного титана, полученного методами интенсивной пластической деформации. Показано, что процесс поглощения энергии в материале с нанокристаллической структурой претерпевает качественные изменения вследствие особенностей взаимодействия в ансамбле зернограничных дефектов. Предложено объяснение механизмов поглощения в рамках нового класса критических явлений для мезоскопических систем с дефектами структурно-скейлинговых переходов.

PACS: 81.07.b.c, 62.20.mc

Исследуется процесс диссипации энергии при циклическом деформировании поли- и субмикрокристаллического титана на основе экспресс-метода определения предела усталости материалов методом инфракрасного мониторинга [1]. Идея метода основана на установлении корреляций между уровнем диссипации энергии и переходом к завершающей стадии усталостного разрушения, что позволяет определить величину предела усталости при различных уровнях среднего напряжения.

Сравнительные данные механических свойств титана Grade 2 в поликристаллическом и нанокристаллическом состояниях

Вид обработки	Предел прочности σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Исходное крупнозернистое состояние (размер зерна около $25 \mu\text{m}$)	440	370	38
ИПД + теплая прокатка (размер зерна около $0.3 \mu\text{m}$)	1090 ± 20	980 ± 20	13 ± 1

Исследовались образцы титана Grade 2 в поли- и наноструктурном состояниях. Наноструктурный титан был получен методом интенсивной пластической деформации [2] и имел размер зерна $\sim 150 \text{ nm}$. Сравнительные данные механических свойств титана Grade 2 в поликристаллическом и нанокристаллическом состояниях представлены в таблице. Геометрия и размеры образцов изображены на рис. 1. В качестве нагружающего устройства использовалась резонансная электродинамическая машина Vibrophore Amsler, обеспечивающая одноосное циклическое нагружение образцов с заданным усилием. Резонансная частота образца равнялась 76 Hz. Для записи поля температур использовалась инфракрасная камера CEDIP Jade III. Чувствительность камеры не менее 25 mK при 300 K, спектральный диапазон 3–5 μm , максимальный раз-

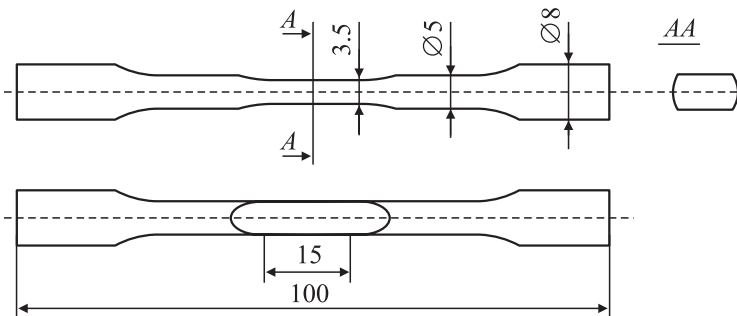


Рис. 1. Геометрия образцов, используемых для циклических испытаний. Размеры рабочей части образца $15 \times 5 \times 3.5 \text{ mm}$.

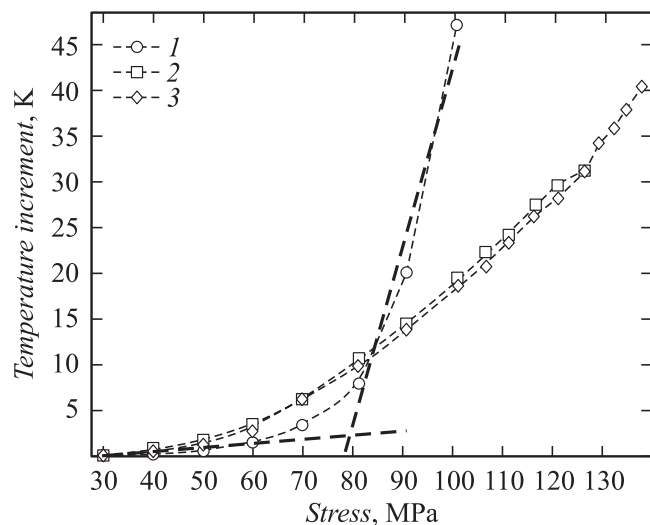


Рис. 2. Изменение средней температуры титановых образцов в крупнозернистом (1), нанокристаллическом (2,3) состоянии в зависимости от среднего напряжения при циклическом нагружении.

мер кадра 320×240 точек. История усталостного нагружения образцов включала „циклические“ блоки по 30 000 циклов, с коэффициентом асимметрии цикла 0.1. Для каждого последующего блока среднее напряжение увеличивалось на 10 МПа. На каждом шаге нагружения измерялось среднее повышение температуры образца. Между циклами образец разгружался и выдерживался до прихода в состояние теплового равновесия с окружающей средой. На рис. 2 представлены результаты экспериментов для образцов с титана с поликристаллической и нанокристаллической зеренной структурой. Поликристаллический титан демонстрирует нелинейный двухстадийный рост диссипации. В соответствии с применяемой методикой точка пересечения прямых на рис. 2 дает оценку значения предела усталости для крупнозернистого титана (среднее напряжение 80 МПа, максимальное напряжение 145 МПа).

Эксперимент заканчивался при выходе температуры образца из рабочего диапазона камеры с выдержкой $1100 \mu\text{s}$ (75°C). Результаты инфракрасного сканирования показали, что циклическое нагружение

нанокристаллического титана сопровождается качественным изменением механизмов диссипации. При малых амплитудах напряжений средняя температура образца с мелким зерном незначительно превышает температуру крупнокристаллического титанового образца. При напряжении порядка предела усталости картина качественно изменяется. Для напряжений выше предела усталости приращение температуры в нанокристаллическом образце существенно ниже, чем для образцов в поликристаллическом состоянии. Устойчивая линейная зависимость скорости роста температуры от величины средних напряжений характерна для всей истории нагружения нанокристаллических образцов. Температура образцов стабилизируется примерно после 20 000 циклов, что отражает способность образцов с нанокристаллической структурой к формированию равновесной системы зернограничных дефектов и качественно подтверждает теоретический результат о формировании „решетки“ зернограничных дефектов, характерный размер которых (дислокационная плотность) однородно увеличивается по объему образца с увеличением среднего напряжения.

Разрушение нанокристаллических образцов в ходе циклического нагружения имело квазихрупкий характер и происходило при амплитуде напряжений на 35% (для первого образца), 40% (для второго образца) большей, чем для титана в обычном поликристаллическом состоянии.

Интенсивная пластическая деформация приводит к формированию в титане ультрамелкодисперсных неравновесных структур, для которых характерно присутствие высоких плотностей решеточных и зернограничных дефектов, формирующих дальнедействующие поля упругих напряжений [3]. Это обстоятельство позволяет рассматривать наноструктурное состояние вещества как метастабильное. В результате пластическое и циклическое деформирование данных материалов сопровождается аномалиями диссипации и поглощения энергии. Развитая ранее статистико-термодинамическая теория твердых тел с мезоскопическими дефектами позволила установить новый класс критических явлений, обусловленный коллективным поведением ансамблей дислокационных дефектов, — структурно-скейлинговые переходы и предложить объяснение закономерностей переходов от поликристаллического к объемному нанокристаллическому состоянию [4]. Особенностью этого класса критических явлений, характерного для неравновесных систем с дефектами, является существование дополнительного параметра порядка — порядка структурного скейлинга, зависящего от

масштабных характеристик среды и взаимодействия между дефектами. Предложенная на основе статистического описания термодинамика и феноменология явилась обобщением подхода Гинзбурга–Ландау и позволила установить качественно различную динамику структурно-скейлинговых переходов в соответствующих областях параметра структурного скейлинга, связанную с типами коллективных мод ансамблей дефектов, характерных для квазихрупкого, вязкого (пластического) и объемного нанокристаллического состояний. Кинетика указанных параметров порядка определяет релаксационную способность материала при формировании пластических сдвигов, особенности переходов от дисперсного к макроскопическому разрушению, закономерности поглощения и диссипации энергии в процессе деформирования.

Качественные различия в поведении материалов в области поли- и нанокристалличности обусловлены различными типами коллективных мод в дислокационных субструктурах (ансамблях зернограничных дефектов), формирующихся в условиях структурно-скейлинговых переходов. Эти особенности ярко проявляются при циклических нагружениях, в частности при многоциклового усталости — распространенном типе нагружения, характеризующемся многократным (более 10^6 циклов) периодическим по амплитуде изменением напряжения относительно некоторой средней величины нагрузки.

Кинетика структурно-скейлинговых переходов определяется типом коллективных мод в ансамблях дефектов, изменение которых связано с качественной сменой механизмов деформации, что является также следствием резкого изменения симметрии системы. В [4] установлено, что при переходе от поликристаллического к объемному нанокристаллическому состоянию коллективные моды автосолитонной природы сменяются пространственно локализованными неподвижными структурами, формирующимися на некоторых характерных пространственных масштабах. Качественная смена коллективных мод отражает изменение механизмов деформации, характеризующихся существованием пороговых напряжений течения для автосолитонных мод локализованной пластичности в случае поликристаллических материалов и формированием „решеток“ зернограничных дефектов („дислокационных кристаллов“) при переходе к субмикроструктурности.

Известно, что баланс энергии при пластической деформации характеризуется диссипативным и конфигурационным вкладом. Первый из них, диссипативный, приводит к повышению температуры образ-

ца, второй, конфигурационный, определяется количеством „связанной“ энергии, заключенной в полях структурных напряжений дислокационных субструктур различных масштабных уровней. Для поликристаллических материалов пластическая деформация реализуется как последовательный масштабный (скейлинговый) переход к дислокационным субструктурам большего масштаба до тех пор, пока последние, исчерпывая сдвиговую подвижность, не становятся очагами разрушения. Для материалов с нанокристаллической структурой масштабные переходы не являются выраженными и деформирование сопровождается формированием „решетки“ зернограничных дефектов при относительно однородном росте последних. Переход к разрушению в этом случае сопровождается формированием кластера зернограничных дефектов, появление которого должно сопровождаться развитием разрушения по „квазихрупкому“ сценарию. Данное отличие эволюции дислокационных субструктур для поли- и нанокристаллических материалов имеет качественную аналогию с фазовыми переходами первого рода.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, 3, подтверждает вывод о качественном различии механизма диссипации энергии и разрушения для поликристаллического и нанокристаллического титана. На рис. 3 зависимость „интенсивности“ диссипации от среднего напряжения хорошо аппроксимируется линейной зависимостью для различных образцов нанокристаллического титана, что является качественным отличием от обычного состояния материала. Материал с мелким зерном не позволяет трактовать предел усталости как величину напряжения, достижение которого приводит к качественному изменению механизмов структурной релаксации, которые начинают носить выраженный многомасштабный характер на заключительной стадии деформирования. 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 для всех исследованных значений приложенного напряжения. Данный факт характеризует способность субмикроструктурного материала эффективно задействовать структурный (конфигурационный) канал поглощения энергии, вовлекая в этот процесс весь нанокристаллический объем. Менее существенное (чем при квазистатическом нагружении, для которого оцениваются пределы прочности и текучести крупно- и мелкозернистых материалов) отличие напряжения разрушения при цик-

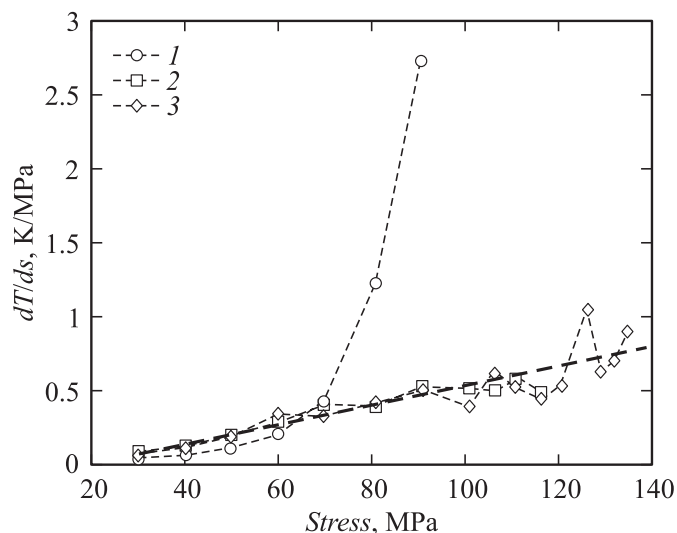


Рис. 3. Зависимость скорости роста средней равновесной температуры образца от среднего напряжения для крупнозернистого (1) и нанокристаллического (кривые 2, 3) титана; пунктирная линия — линейная аппроксимация зависимостей 2, 3 скорости роста средней равновесной температуры образца для нанокристаллического титана.

лическом деформировании обусловлено особенностями циклического нагружения — кинетикой накопления дефектов. Собственно структурная релаксация для материалов с мелкозернистой структурой выражена в значительно меньшей степени, чем для крупнозернистых (пластичных) материалов вследствие эффектов локализации деформации. Этим же объясняется „квасихрупкий“ характер разрушения нанокристаллических материалов, происходящего вследствие формирования локального связанного кластера зернограничных дефектов. Характерно, что для нанокристаллических материалов (в отличие от крупнозернистых) этот переход не сопровождается локализацией деформации и связанной с ней структурной релаксацией.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 07-08-96001, 07-01-91100.

Список литературы

- [1] *Luong M.P.* // Nuclear Engineering and Design. 1995. V. 158. С. 363–376.
- [2] *Latysh V., Semenova I., Salimgareeva G., Kandarov I., Zhu Y., Lowe T., Valiev R.* // Mater. Sci. Forum. 2006. V. 503–504. P. 763–768.
- [3] *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
- [4] *Naimark O.B.* // The Physics of Metals and Metallography. 1997. V. 84. N 4. P. 327–337.