

05;12

# **Эволюция деформационных доменов и кинетика усталостного разрушения поликристаллов дуралюмина на мезоуровне**

© В.Е. Панин, В.С. Плешанов, В.В. Кибиткин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 14 мая 1997 г.

Исследованы закономерности накопления усталостных повреждений при циклическом нагружении поликристаллов алюминиевого сплава в условиях многоциклового усталости путем анализа динамики пространственно-временных мезоскопических субструктур. Показано, что на мезоуровне при периодическом воздействии внешнего механического поля в материале формируются деформационные домены. Эволюция динамических мезоскопических доменных субструктур определяет кинетику усталостного разрушения поликристаллов.

## **1. Введение**

Механизмы усталостного разрушения твердых тел традиционно исследуются в двух направлениях, связанных с различными масштабными уровнями [1–4]. На микроуровне физика пластичности изучает дефекты кристаллического строения, их взаимодействие и эволюцию, используя аппарат теории дислокаций. На макроуровне механика сплошной среды и механика разрушения исследуют интегральные характеристики твердого тела без учета его внутренней структуры. Каждое из этих направлений достигло значительных успехов, однако до сих пор не удавалось ни теоретически, ни экспериментально связать процессы, протекающие в кристаллическом материале на микро- и макроуровнях при циклическом нагружении.

В настоящей работе предлагается новый подход к исследованию закономерностей нарушения сплошности при усталости, основанный на положениях физической мезомеханики материалов [5]. Согласно последним, на промежуточном (мезоскопическом) масштабном уровне

носителем пластической деформации в твердом теле является объемный структурный элемент (мезообъем), которому присущи как трансляционные, так и ротационные моды деформации. Движение мезообъемов может быть описано и проанализировано на основе уравнений механики сплошной среды, а аккомодационные процессы внутри мезообъемов и на их границах могут быть рассмотрены на основе теории дислокаций на микроуровне. В процессе нагружения на поверхности материалов формируются пространственно-временные мезоскопические субструктуры, анализ динамики которых может являться основой для изучения механизмов деформации и усталостного разрушения при циклическом нагружении.

Экспериментальные исследования мезоскопических механизмов усталостного разрушения поликристаллов проводили в условиях многоциклового усталости на плоских образцах конструкционного алюминиевого сплава Д16 АТ с размерами  $75 \times 10 \times 0.8$  mm. Средний размер зерна в сплаве составлял  $18 \mu\text{m}$ , предел текучести 250 МПа, предел прочности 370 МПа, микротвердость 870 МПа, пластичность 13%. С целью введения макроконцентратора напряжений, инициирующего процессы накопления повреждений, в центре образца располагалось отверстие диаметром 2 mm. Испытания проводили по схеме циклического растяжения (push–pull) при нагрузке  $50 \pm 50$  МПа с частотой 1.5 Hz. Закономерности формирования мезосубструктур изучали с помощью оптико-телевизионной измерительной системы [5], позволяющей строить поля векторов смещений элементарных участков поверхности и рассчитывать распределения локальных компонент тензора пластической дисторсии: продольной  $\varepsilon_{xx}$ , поперечной  $\varepsilon_{yy}$ , сдвиговой  $\varepsilon_{xy}$  и поворотной  $\omega_z$ .

## 2. Результаты и их обсуждение

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что процесс усталостного разрушения поликристаллов дуралюмина на мезоуровне можно разделить на пять основных стадий развития:

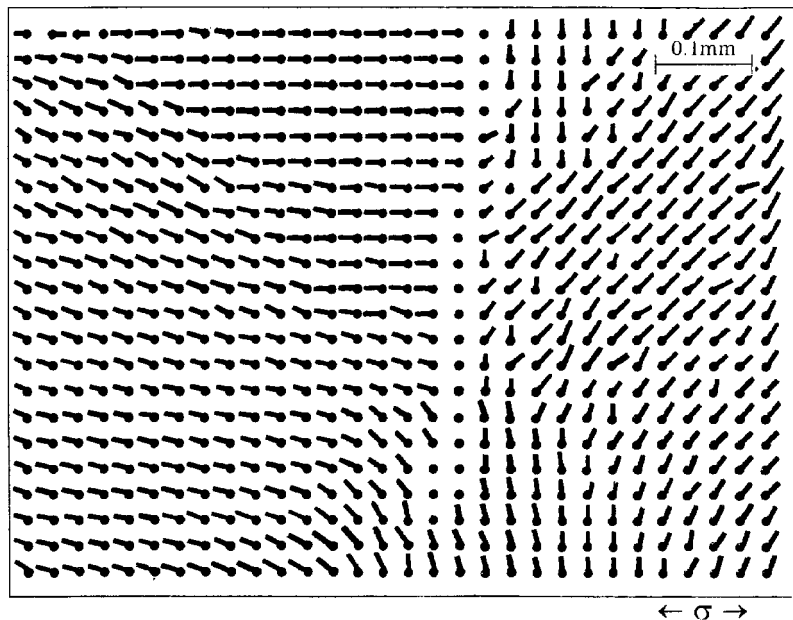
- стадия стохастически распределенных зон пластических сдвигов в области минимального поперечного сечения образца;
- стадия зарождения и квазихрупкого роста поверхностных микротрещин в локальной области пластических сдвигов;
- стадия хрупкопластического роста поверхностных трещин;
- стадия развития магистральной усталостной трещины;
- стадия пластической вытяжки и долома.

Каждой стадии соответствует свой тип формирующейся на поверхности нагруженного поликристалла мезоскопической субструктуры.

Первая стадия связана с формированием в образце в области материала с максимальными растягивающими напряжениями системы случайным образом распределенных зон с размерами от 3–5 до 15–25  $\mu\text{m}$ , в которых локализуются пластические сдвиги. В процессе нагружения эти зоны меняют свое местоположение, что приводит к деформационному упрочнению материала, зарождению и квазихрупкому росту поверхностных усталостных микротрещин на второй стадии разрушения. В окрестности данных трещин пластическая деформация материала экспериментально практически не фиксируется. Эти поверхностные трещины развиваются в тонком поверхностном слое, связанном с окисной пленкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , роль которой в развитии деформации на мезоуровне подробно исследована в [6] для поликристаллов алюминия.

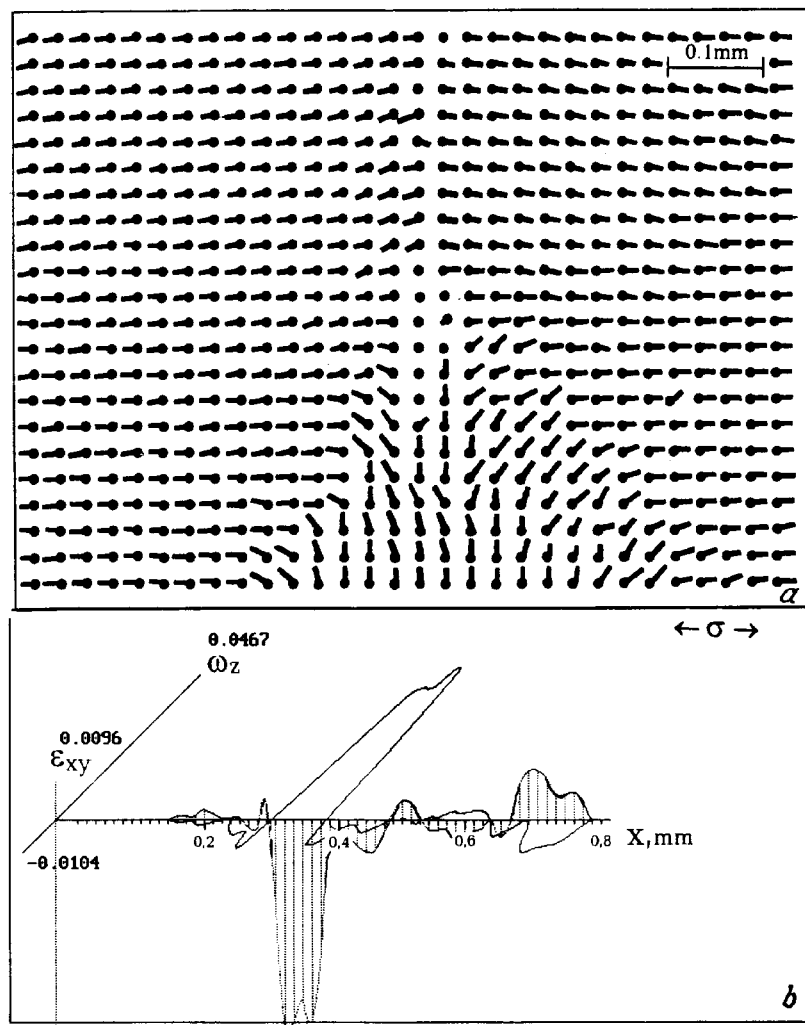
Начиная с определенного значения длины поверхностной трещины (0.4–0.5 mm), перед ее вершиной становится заметной пластическая деформация. Это означает начало третьей стадии нарушения сплошности поликристалла. В нагруженном материале перед фронтом трещины формируется характерная блочная мезосубструктура, представленная в поле векторов смещений на рис. 1. В соответствии с концепцией работы [7] эти блоки можно интерпретировать как объемные мезодефекты — деформационные домены, возникающие в поликристаллах в зонах сильно локализованных пластических сдвигов и перемещающиеся как целое по схеме "сдвиг+поворот". Возникновение деформационных доменов является важнейшим этапом в процессе усталостного разрушения на мезоуровне. Оно означает начало объемных смещений в материале в локальной зоне концентратора напряжений и предшествует появлению в данной области поликристалла усталостной трещины. Исследования показали, что траектория усталостной трещины определяется междоменными границами вдоль нормали к направлению максимальных растягивающих напряжений. Это хорошо согласуется с теоретическими результатами работы [8].

Во внешнем механическом поле в процессе циклического нагружения деформационные домены стремятся ориентироваться в направлении оси нагружения. Этим обусловлена четвертая стадия разрушения — превращение поверхностной усталостной трещины в сквозную (магистральную) и эволюция последней. На мезоуровне движение поверхностей магистральной трещины в отличие от общепринятой схемы



**Рис. 1.** Деформационные домены перед фронтом поверхностной усталостной трещины (трещина вверх). Количество циклов нагружения  $N = 60 \cdot 10^3$ .

”сдвиг–отрыв” [9] можно описать с позиций динамических доменных субструктур схемой ”сдвиг–поворот–отрыв”. Смежные с берегами магистральной трещины деформационные домены смещаются в направлении приложенной нагрузки, реализуя таким образом механизм нормального отрыва (рис. 2, *a*). Ему предшествует пространственное перемещение деформационных доменов по схеме ”сдвиг+поворот”. Это хорошо видно на рис. 2, *b*: в области фронта трещины домены имеют переменную ориентацию и испытывают трансляционно-ротационное движение с сильной локализацией сдвиговых  $\varepsilon_{xy}$  и поворотных  $\omega_z$  мод деформации перед вершиной трещины. Аккомодационным процессом этому неизбежно является образование свободной поверхности в вершине магистральной трещины по механизму ”сдвиг+поворот”. Учет поворотной компоненты в данном случае является принципиальным и хорошо согласуется с положениями физической мезомеханики, согласно



**Рис. 2.** Доменная мезосубструктура в области магистральной трещины (а) и распределение локальных сдвигов  $\varepsilon_{xy}$  и поворотов  $\omega_z$  перед вершиной трещины (б).  $N = 86 \cdot 10^3$ .

которым ротационные моды деформации лежат в основе процессов разрушения материалов.

Заключительная, пятая стадия усталостного разрушения связана с формированием от вершины магистральной трещины к боковой поверхности образца треугольной зоны пластической вытяжки [10]. Процесс развития магистральной трещины при этом достигает точки бифуркации, и разрушение путем образования свободной поверхности на фронте усталостной трещины спонтанно сменяется пластическими сдвигами в направлении максимальных касательных напряжений. Это явление обусловлено перегрузкой образца (превышением предела текучести) при длине магистральной трещины 2.0–2.2 мм. Сопряженные границы зоны вытяжки ориентированы под углами 45 и 135° к оси нагружения. Смещение мезодефектов к вершине трещины по этим границам происходит по сдвиговому механизму. При дальнейшем циклическом нагружении в зоне пластической вытяжки в результате роста поворотной моды деформации происходит долом образца.

### 3. Заключение

Изложенные материалы позволяют сделать заключение, что кинетика усталостного разрушения поликристаллов дуралюмина определяется процессом развития динамической мезоскопической доменной субструктуры по схеме "сдвиг–поворот–отрыв". Началу усталостного разрушения предшествует возникновение поперечных микротрещин в хрупком поверхностном слое, связанном с поверхностной окисной пленкой  $Al_2O_3$ .

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 96–01–00902).

### Список литературы

- [1] *Иванова В.С., Гуревич С.Е., Копьев И.М.* и др. Усталость и хрупкость металлических материалов. М.: Наука, 1968. 216 с.
- [2] *Троценко В.Т.* Усталость и неупругость металлов. Киев: Наук. думка, 1971. 268 с.
- [3] *Разрушение* / Под ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1973. Т. 1. 616 с.
- [4] *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин А.А.* и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 363 с.

- [5] Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с.
- [6] Панин В.Е., Панин С.В. // Изв. вузов. Физика. 1997. № 1. С. 31–39.
- [7] Панин В.Е., Панин С.В., Мамаев А.И. // ДАН. 1996. Т. 350. № 1. С. 35–38.
- [8] Erdogan F., Sih G.C. // J. Basic Engin. 1963. V. 85. N 4. P. 519–527.
- [9] Tomkins B. // Metal Science. 1979. V. 13. P. 387–395.
- [10] Вайншток В.А., Красовский А.Я., Надеждин Г.Н. и др. // Проблемы прочности. 1978. № 11. С. 101–108.