

УДК 539.2

## ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИН НА ГРАНИЦЕ СВОБОДНОГО УПРУГОГО ДВОЙНИКА

© В.А. Федоров, Ю.И. Тялин, Т.Н. Плужникова, В.А. Куранова, М.В. Чемёркина

Feodorov V.A., Tjalin Y.I., Plushnikova T.N., Kuranova V.A., Chemerkina M.V. Nucleation of cracks at the interface of free elastic twin. It was installed, that cracks nucleation at the interface of twin is connection with singularities of distribution twins dislocations. It was verificationed not only theoretically, but experimentally.

### ВВЕДЕНИЕ

Прочность – одно из важнейших практических свойств твердых тел. Поэтому развитие физических представлений о природе разрушения остается предметом интенсивного изучения в современном материаловедении.

Первой и зачастую определяющей стадией разрушения кристаллических твердых тел является формирование зародышевых микротрещин. В основе современных представлений о зарождении трещин в кристаллах лежит концепция А. В. Степанова о взаимосвязи процессов разрушения и пластической деформации [1]. Последняя рассматривается как необходимый подготовительный этап разрушения кристаллических твердых тел. К настоящему времени благодаря развитию теории дислокаций и использованию современных методов исследования предложено большое количество дислокационных механизмов зарождения разрушения. Среди известных вариантов «пластического» формирования зародыша микротрещины заметную роль играют механизмы, обусловленные деформационным двойникованием [2].

Несмотря на распространенность деформации двойникованием, взаимосвязь последнего с процессами зарождения микротрещин изучена недостаточно полно. В отечественной и зарубежной литературе зарождение трещин при механическом двойниковании рассматривается с сугубо феноменологических позиций.

В настоящей работе анализируется образование трещин при упругом двойниковании кристаллов кальцита. Кристаллы кальцита в достаточно широком интервале температур деформируются исключительно двойникованием, а оптическая прозрачность кристаллов позволяет наблюдать внутренние дефекты непосредственно. Упругий двойник в кристалле получали по методике Р.И. Гарбера [3]. Образцы выкалывались по плоскости спайности из крупных блоков. Две противоположные грани образца шлифовались таким образом, чтобы они были перпендикулярны одной из плоскостей двойникования и направлению сдвига в ней. Изготовленные образцы имели размеры 8×8×10 мм. Нагружение проводили при помощи сферического индентора, при постепенном увеличении нагрузки. Двойник появлялся при нагрузках 30–40 Н, затем увеличивал свои размеры с ростом нагружающего усилия. Максимальная длина двойника достигала 6–7 мм. При неко-

торой критической нагрузке ( $\approx 78$  Н) на границе двойника появляется трещина (рис. 1). Трещины появлялись преимущественно в хвостовой части двойника. После образования трещин длина двойника уменьшалась. При снятии нагрузки двойник сразу же выходил на поверхность трещины. Если образец оставался нагруженным, то размеры двойника постепенно уменьшались, а размеры трещины увеличивались. После выдержки  $\sim 12$  часов двойник практически всегда выходил на поверхность трещины.

В связи с изложенным, была поставлена задача оценить распределение плотности дислокаций в двойниковых границах и упругих напряжений в окрестности двойника.

Равновесная форма двойника определялась из решения системы уравнений:

$$A \sum_{j=1}^n \frac{(x_i - x_j)[(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2]}{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^2} + \frac{mA}{x_i} - \tau_s = 0, \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, n,$

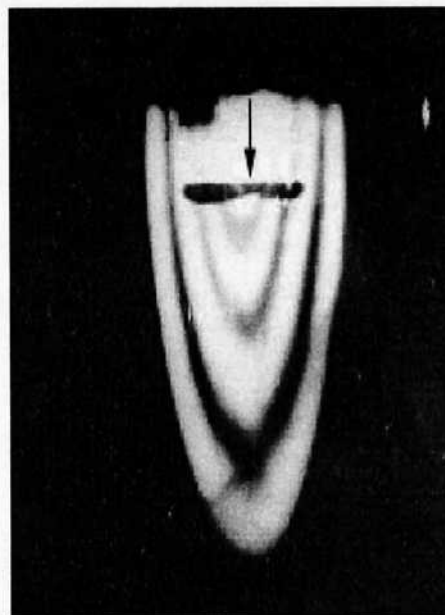


Рис. 1. Трещина, появившаяся на границе упругого двойника (отмечена стрелкой)

где  $A = Gb/2\pi(1-\nu)$ ,  $G$  – модуль сдвига,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $m$  – мощность супердислокации, моделирующей внешнюю нагрузку,  $\tau_s$  – напряжения трения,  $x_i$  и  $y_i$  – координаты дислокаций. Эта система нелинейных уравнений может быть решена численными методами. Использовались следующие значения упругих констант:  $G = 3,2 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>;  $b = 1,27 \cdot 10^{-8}$  см;  $\nu = 0,3$ . Величины  $n$  и  $m$  менялись от единиц до ста. Результаты расчета равновесных координат дислокации для различных значений напряжений трения приведены на рис. 2. По оси  $X$  отложены координаты дислокаций, а по оси  $Y$  – их номер. В этом случае зависимость  $n(x)$  дает форму двойника (в масштабе по  $OY$ ). Видно, что вершина свободного двойника является вытянутой в направлении его движения и имеет форму заостренного клина. Данная форма вершины хорошо согласуется с результатами работы [4], где рассмотрено континуальное описание двойника, заданного плоским скоплением двойникоующих дислокаций. Причем форма двойника не изменяется с увеличением напряжений трения  $\tau_s$ . С ростом  $\tau_s$  двойник только сокращает свою длину.

Относительное изменение плотности дислокаций (рис. 3) при этом более существенно. Видно, что при изменении  $\tau_s$  в тех же пределах плотность дислокаций  $\rho$  увеличивается почти на порядок.

Но даже самые большие значения  $\rho$  для свободного двойника заметно меньше, чем плотность  $\rho$  в вершине заторможенного двойника, при которой могут образовываться микротрещины. Например, для образования трещины по силовому механизму дислокации должны сблизиться на расстояние, равное  $2,41h$ . Это следует из анализа взаимодействия дислокаций, движущихся в параллельных плоскостях скопления (рис. 4) [5].

Из рис. 4 видно, что сила отталкивания второй дислокации со стороны первой имеет максимум при  $d = 2,41h$ . Дальнейшее же сближение дислокации до их слияния по силовому механизму при  $x_2 - x_1 = b$  может происходить без увеличения внешней нагрузки. Поэтому критерием силового зарождения микротрещины в вершине двойника можно считать сближение головных дислокаций до расстояния между ними  $x_2 - x_1 = 2,41h$ .

Особый интерес представляет область растягивающих напряжений  $\sigma_{xx}$ , расположенная под плоскостью двойникоования. Каждая из дислокаций двойника создает напряжение:

$$\sigma_{xx} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \quad (2)$$

Суммируя (2) по числу дислокаций, можно рассчитать напряжение в зоне растяжения под плоскостью двойникоования. Результаты расчета представлены на рис. 5. Здесь приведено изменение напряжений  $\sigma_{xx}$  вдоль двойника на расстоянии от плоскости двойникоования, равной одной десятой его длины. Видно, что максимум растягивающих напряжений смещен к хвостовой части двойника. И если допустить, что трещина может зародиться в области максимальных растягивающих напряжений, то они будут появляться не в головной, а ближе к хвостовой части двойника. Именно

но в этой области и наблюдаются трещины на границе свободного упругого двойника (рис. 1).

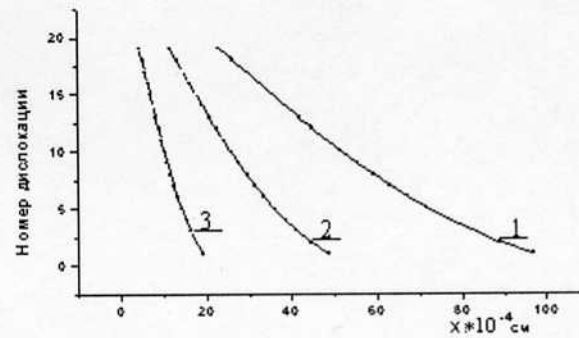


Рис. 2. Форма двойниковой границы: 1 –  $\tau = 10^7$  дин/см<sup>2</sup>; 2 –  $\tau = 2 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup>; 3 –  $\tau = 5 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup>

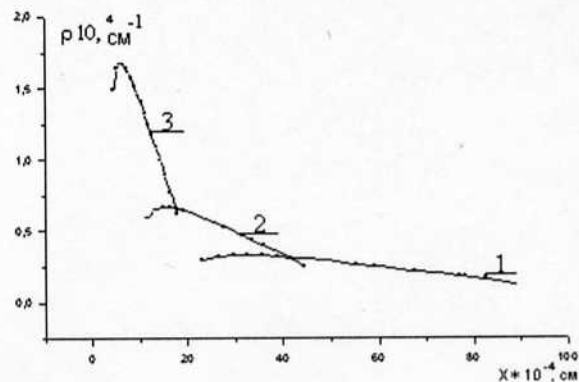


Рис. 3. Распределение плотности дислокаций в двойниковой границе: 1 –  $\tau = 10^7$  дин/см<sup>2</sup>; 2 –  $\tau = 2 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup>; 3 –  $\tau = 5 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup>

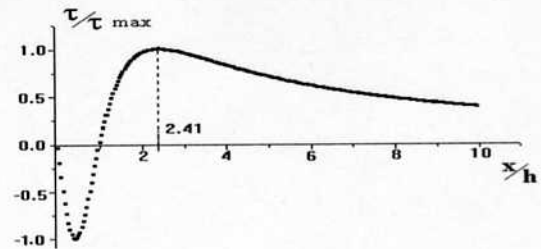


Рис. 4. Взаимодействие дислокаций, движущихся в соседних плоскостях скольжения

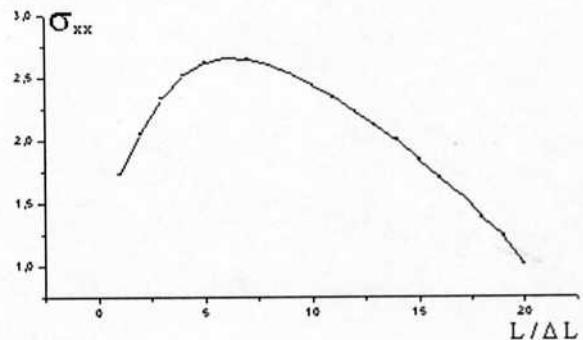


Рис. 5. Распределение напряжений  $\sigma_{xx}$  вдоль двойника

Таким образом, установлено, что зарождение трещин на границе свободного упругого двойника обусловлено особенностями распределения двойнивающих дислокаций в его границе, что подтверждается не только расчетом, но и экспериментом [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Владимиров В.И.* Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
2. *Финкель В.М., Федоров В.А., Королев А.П.* Разрушение кристаллов при механическом двойниковании. Ростов-н/Д: Изд-во Ростов. ун-та, 1990. 176 с.
3. *Гарбер Р.И.* Образование упругих двойников при двойниковании кальцита // Докл. АН СССР. 1938. Т. 21. № 5. С. 233-235.
4. *Косевич А.М.* Дислокации в теории упругости. Киев: Наукова думка, 1978. 220 с.
5. *Рыбин В.Н., Ханнанов Ш.К.* Учет реальной структуры скопления дислокаций в задаче о термоактивированном зарождении трещины // Физика твердого тела. 1969.
6. *Федоров В.А., Николюкин А.М., Плужникова Т.Н., Чиванов А.В.* О термоактивированном зарождении трещин на границе упругого двойника в кальците // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. Тамбов, 2000. Т. 5. Вып. 2-3. С. 382-383.