

**О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАСТУЩЕЙ ТРЕЩИНЫ С ГРАНИЦЕЙ
В БИКРИСТАЛЛАХ**

И. С. Гузь, Г. С. Демина, А. М. Левиус, Г. А. Червов

(Новокузнецк)

Методом динамической фотоупругости в сочетании с избирательным травлением в бикристаллах фтористого лития исследовано взаимодействие растущей трещины с границами наклона. Обнаружено изменение напряжений в вершине трещины при подходе к границе. Найдена зависимость скорости трещины от угла падения ее на границу и угла разориентировки последней. Изменение скорости трещины связывается с изменением напряженного состояния в ее вершине. Построено аналитическое и экспериментальное распределение напряжений впереди растущей трещины.

Известно, что структура материала оказывает определенное влияние на развитие медленных трещин [1-5].

Прорыв растущих трещин через субграницы кручения и наклона рассматривался в работе [6]. Изменение кинетики роста быстрых трещин авторы связывают с влиянием структуры материала. Не производя записи формы нагрузки и не регистрируя изменения напряженного состояния в вершине трещины, а лишь изучая кинетику ее роста, такую связь можно установить лишь гипотетически.

В данной работе исследуется взаимодействие растущей трещины с границей наклона в бикристаллах фтористого лития с углом разориентировки от 1 до 25°. Исследования проводились методом динамической фотоупругости. Образцы (5 × 40 × 60 мм²) подвергались динамическому расколу с помощью ножа, на верхнем торце которого производился микровзрыв. Длительность импульса порядка 20 мксек. Регистрация процесса распространения трещины осуществлялась с помощью кинокамеры СФР-1М (скорость съемки 2.5 млн. кадр./сек). Съемка производилась в циркулярно поляризованном свете.

Для определения влияния границы на распределение напряжений в вершине растущей трещины следует вначале изучить напряженное состояние в ее окрестности до подхода к границе, а затем при прохождении через нее. Для этого проводилась киносъемка роста трещины в моно- и бикристаллах. Кинограмма роста трещины при динамическом нагружении в монокристалле приведена на фиг. 1, а. Для перехода от наблюдаемых на кинокадрах интерференционных просветлений к величине τ_{\max} можно воспользоваться работой [7], считая распределение напряженного состояния в устье движущейся трещины квазистатическим. Тогда для анизотропного нагруженного тела имеет место равенство

$$(1) \quad \delta = d_0 (B_1 - B_2) (\bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_y)$$

Здесь δ — разность хода лучей, создаваемая в образце, d_0 — толщина образца, $\bar{\sigma}_x$ и $\bar{\sigma}_y$ — усредненные по толщине образца нормальные напряжения, которые приложены в площадках, перпендикулярных к главным осям оптического эллипсоида

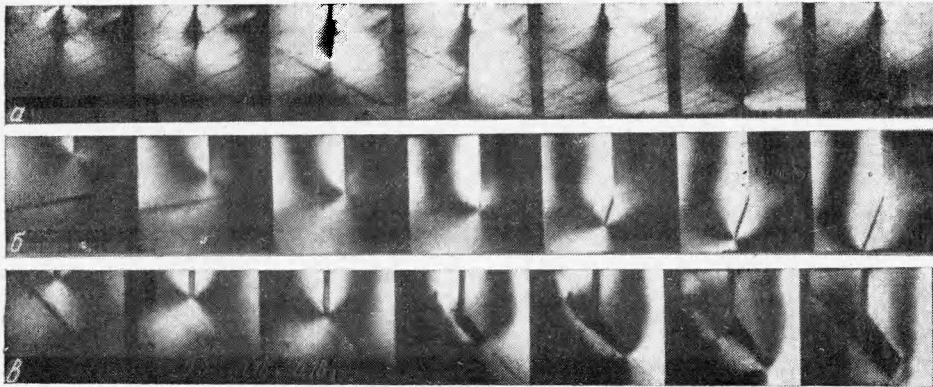
$$B_1 - B_2 = \frac{\kappa(C_{11} - C_{12})C_{44}}{\sqrt{C_{44}^2 \cos^2 2\beta + (C_{11} - C_{12})^2 \sin^2 2\beta}}$$

где c_{11} , c_{12} , c_{44} — оптические константы, β — угол между главной осью оптического эллипсоида и направлением [100], k — постоянная материала для LiF.

Значения оптических констант приведены в работе [7]. Из теории упругости известно, что

$$(2) \quad \bar{\sigma}_x - \bar{\sigma}_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha$$

где σ_1 и σ_2 — главные нормальные напряжения, α — угол между главными осями оптического эллипсоида и эллипсоида напряжений.



Фиг. 1

Из (1) и (2) имеем

$$(3) \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\delta}{2d_0(B_1 - B_2) \cos 2\alpha}$$

Поскольку в данных опытах получаемая ширина полосы не превышала 0.5, была использована следующая зависимость:

$$(4) \quad \delta = \frac{\lambda}{\mu} \arcsin \sqrt{\frac{I - I_0}{I_{\max}}}$$

где λ — длина волны используемого света ($\lambda = 5500 \text{ \AA}$), I — интенсивность света, прошедшего через анализатор, I_0 — интенсивность при скрещенных поляроидах, I_{\max} — интенсивность при параллельных поляроидах без I_0 . Можно показать, что

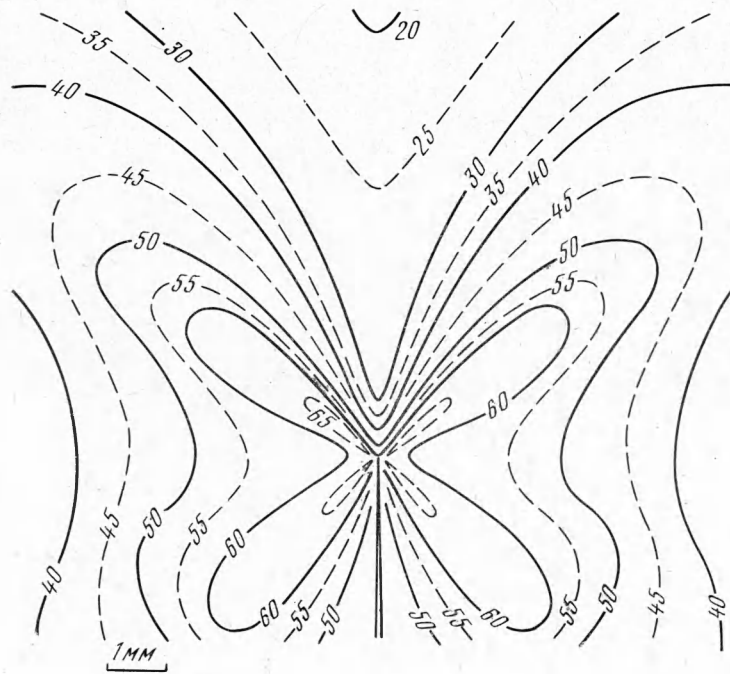
$$(5) \quad \cos 2\alpha = \frac{C_{11} \cos^2 2\beta + (C_{11} - C_{12}) \sin^2 2\beta}{C_{11}^2 \cos^2 2\beta + (C_{11} - C_{12})^2 \sin^2 2\beta}$$

Из (3) и (4) видно, что для определенных τ_{\max} необходимо знать интенсивность прошедшего через образец света I и угол β . Все прочие величины либо постоянны (d_0 , λ), либо связаны с β (α , $B_1 - B_2$). Интенсивность оценивалась по плотности почернения пленки, которая измерялась на микрофотометре МФ-2.

Для определения β необходимо найти распределение изоклин. С этой целью в кинематографируемую область на пути роста трещины устанавливалась пять полярископов: один круговой и четыре плоских. Плоские полярископы устанавливались так, чтобы одновременно регистрировались изоклины с параметрами 0, 22.5, 45, 60°. Величины τ_{\max} были вычислены по формуле (3) с учетом (4) и получено следующее распределение напряжений в вершине быстрой трещины (фиг. 2). Оно показывает, что наиболь-

шие максимальные касательные напряжения τ_{\max} действуют в четырех плоскостях, проходящих через вершину трещины; они образуют характерную крестообразную розетку.

Подобные розетки напряжений в вершине стационарной трещины описаны в работе [8], однако там они имели строго симметричную форму правильного креста, повернутого на 45° к направлению трещины. В случае динамического нагружения заметна некоторая асимметрия розетки напряжений (фиг. 2), что, несомненно, связано с динамическим характером процесса.



Фиг. 2

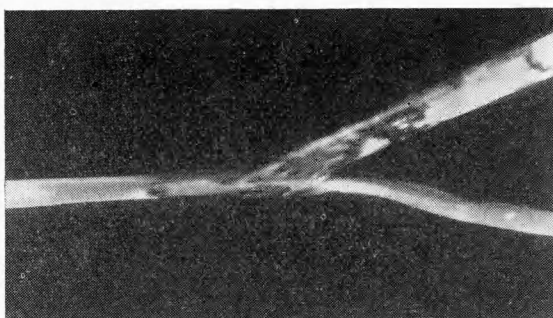
Экспериментальное распределение напряжений впереди растущей трещины сравнивалось с расчетным, полученным по методике, предложенной в работе [9]. Расчет проводился для скоростей, соответствующих экспериментально зарегистрированным. Сопоставление аналитических и экспериментальных результатов (см. ниже)

r , мм	0.35	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6
τ_{\max} , кг/см ² экспериментальная	50	40	31	28.5	26.2	24.8	24.5	23.5	20
τ_{\max} , кг/см ² расчетная	46	37.6	28.9	26.5	24.8	23.2	24.5	23.5	20

дает основание утверждать, что на определенном расстоянии от вершины трещины $r \geq 4$ мм наблюдается хорошее соответствие между ними. Однако при расстояниях, меньших этого значения, наблюдается несоответствие, которое может быть отнесено как к погрешностям экспериментальной обработки результатов, так и к неточностям описания исследуемых явлений. Таким образом, для описания квазихрупкого разрушения в первом приближении можно использовать основные положения теории упругости.

Характерные кинограммы прохождения трещины в кристаллах приведены на фиг. 1. Из рассмотрения их видно, что при распространении трещины в глубь монокристалла (фиг. 1, а) в ее вершине образуется характерный «факел», указывающий на концентрацию напряжений. При движении трещины в пределах кадра не отмечалось изменения интенсивности просветления, т. е. по крайней мере на расстоянии 15 мм (размер поля съемки) не происходило изменения поля напряжений в вершине растущей трещины.

При распространении трещины в бикристалле с границей наклона (фиг. 1, б) характер просветлений в вершине трещины такой же, как и при движении трещины в монокристалле (фиг. 1, а), поэтому распределение напряжений подобно показанному на фиг. 2. Однако при переходе через границу, интенсивность просветления падает. Этот эффект существенно зависит от взаимной ориентировки зерен бикристалла, т. е. угла разориентировки границы θ и угла падения трещины на границу φ (φ — угол между трещиной и нормалью к границе). При переходе трещины через границу с углом разориентировки $\theta \leq 4^\circ$ изменение интенсивности практически не наблюдается, каков бы ни был угол падения φ . Ослабление напряжений в вершине трещины при переходе ее через границу в бикристалле растет с увеличением угла разориентировки границы θ ($\theta > 4^\circ$) и угла φ .



Фиг. 3

Приведенные результаты по изменению двулучепреломления подтверждаются анализом скоростей роста трещины. Как известно, скорость роста трещины при динамическом нагружении зависит от величины напряжений в ее вершине. Поэтому по изменению скоростей трещин можно судить и об изменении напряжений.

Для определения скоростей трещин были проведены измерения длины растущих трещин по кадрам полученных кинограмм. Чтобы повысить точность измерений, учитывалось некоторое смещение поля съемки от одного ряда кадров кинограммы к другому, которое допускает оптическая схема камеры СФР-1М. По вычисленным средним скоростям, которые имела трещина при переходе к границе и после перехода через нее, находилось относительное изменение скорости

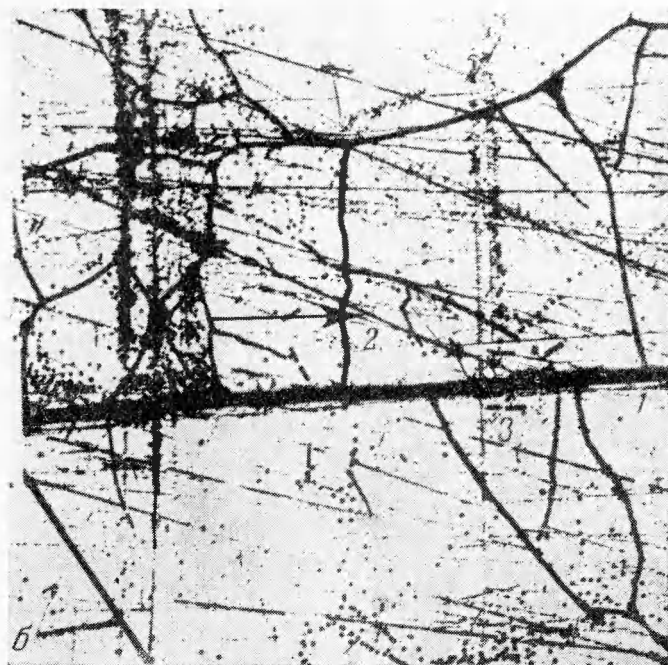
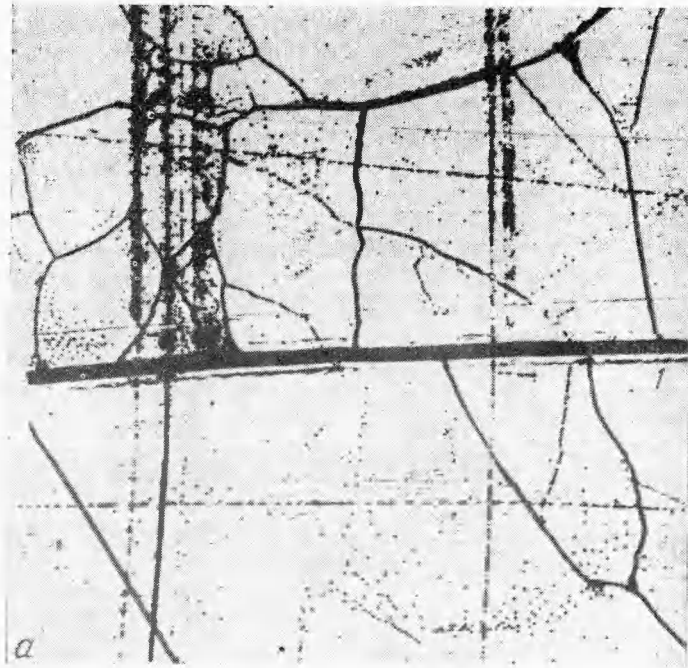
$$\Delta v/v = (v_0 - v')/v_0$$

где v_0 — средняя скорость трещины до прохождения через границу, v' — средняя скорость после прохождения через границу.

Ниже приведены значения относительного изменения скорости трещины для бикристаллов с разными углами разориентировки наклонной границы θ .

θ°	4	6	8	11	15	19	22	24	25
$\Delta v/v_0$	0.22	0.235	0.24	0.26	0.295	0.342	0.42	0.48	0.538

Как видно из таблицы, с увеличением θ изменение скорости растет. Это хорошо согласуется с наблюдаемыми на кинограммах измене-



Фиг. 4

ниями интенсивности просветления (фиг. 1), указывающими на уменьшение напряжений в вершине трещины при переходе через границу.

Величины относительного изменения скорости трещины при прохождении ее через границу от угла падения представлены ниже.

град	19	15	18	25	30	35	40	43
Δv ($\theta = 4^\circ$)	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246
v_0 ($\theta = 24^\circ 30'$)	0.252	0.42	0.53	0.62	0.72	0.82	0.92	1

Видно, что с увеличением угла падения скорость трещины изменяется значительно при больших углах θ и практически не изменяется при малых углах разориентировки ($\theta \leq 4^\circ$). При больших углах падения трещины φ на границу наблюдалась полная остановка трещины на границе и переход ее в расслоение в плоскости самой границы. Кинограмма для этого случая приведена на фиг. 1, в, а внешний вид участка кристалла в месте перехода трещины в плоскость границы — на фиг. 3. В данном случае по существу наблюдается переход транскристаллитного типа разрушения в интеркристаллитный.

В ряде работ [6,8] указывается, что при торможении трещин на разного рода барьерах происходит пластическая релаксация напряжений. В данной работе пластическая деформация при торможении трещин на границе оценивалась по изменению дислокационной структуры.

На фиг. 4 приведены панорамы, составленные из микрофотографий участка поверхности образца и иллюстрирующие изменение дислокационной структуры при торможении трещины на границе в бикристалле (где 1 — граница, 2 — след трещины, 3 — полосы скольжения во втором кристаллите, возникшие при торможении трещины). Из сравнения фигур травления заметно некоторое увеличение плотности дислокаций в районе, где трещина затормозилась на границе. Увеличение плотности дислокаций связано с развитием пластической деформации за счет локального повышения напряжений в зоне остановки трещины. В местах, где трещина встречала препятствия, по ее берегам имеет место увеличение глубины зоны пластической деформации, которое выявляется по дислокационной структуре. Интересной особенностью является то, что при остановке трещины у границы в смежном кристаллите образуются полосы скольжения, расположенные в плоскости скола [100]. При повторном нагружении в этом направлении происходит развитие трещины. Регистрируемые полосы скольжения являются результатом микропластической деформации, предшествующей разрушению.

Поступила 24 X 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Low I. R., Jr. Dislocations and brittle fracture in metals. Madrid, In: Verformung und Fliessen des Festkörpers. Berlin, Springer - Verlag, 1956.
2. Атомный механизм разрушения. М., Металлургиздат, 1963.
3. Gilman J. J. Nucleation of dislocation loops by cracks in crystals. Trans. Americ. Inst. Mining and metallurg. Engng, 1957, vol. 209.
4. Gilman J. J. Cleavage, ductility and tenacity in crystals. In: Fracture, N. Y., John Wiley, London, Chapman and Hall, 1959.
5. Биггс В. Д. Разрушение. В кн. «Физическое металловедение», вып. 3. М., «Мир», 1968.
6. Финкель В. М., Савельев А. М., Зуев Л. Б., Серебряков С. В., Коробов Ю. М., Зуева И. Б. Взаимодействие трещины с дислокационными границами. Физика твердого тела, 1965, т. 7, вып. 5.
7. Краснов В. М., Степанов А. В. Исследование зародышей разрушения оптическим методом. ЖЭТФ, 1952, т. 23, вып. 2.
8. Шаскольская М. П., Ван Янь-вэнь, Гу Шу-чжао. О возникновении дислокаций при распространении и слиянии трещин в ионных кристаллах. Кристаллография, 1961, т. 6, вып. 4.
9. Баренблатт Г. И., Черепанов Г. П. О равновесии и распространения трещин в анизотропной среде. ПММ, 1961, т. 25, вып. 1.