

**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

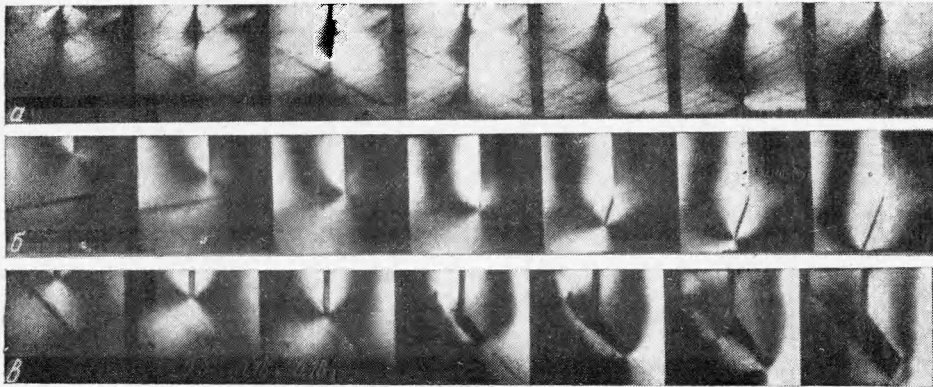
$$B_1 - B_2 = \frac{\kappa(C_{11} - C_{12}) C_{44}}{\sqrt{C_{44}^2 \cos^2 2\beta + (C_{11} - C_{12})^2 \sin^2 2\beta}}$$

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

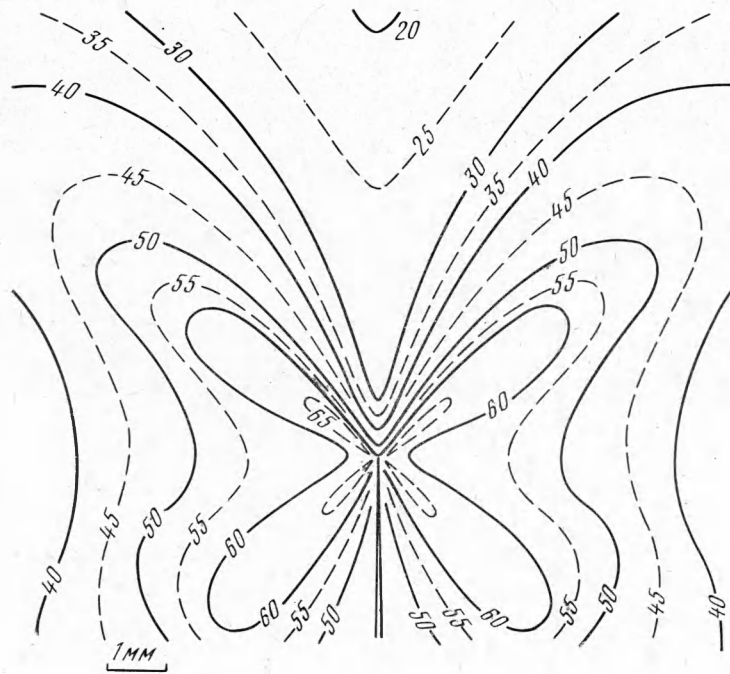
$$(5) \quad \cos 2\alpha = \frac{C_{11} \cos^2 2\beta + (C_{11} - C_{12}) \sin^2 2\beta}{C_{11}^2 \cos^2 2\beta + (C_{11} - C_{12})^2 \sin^2 2\beta}$$

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

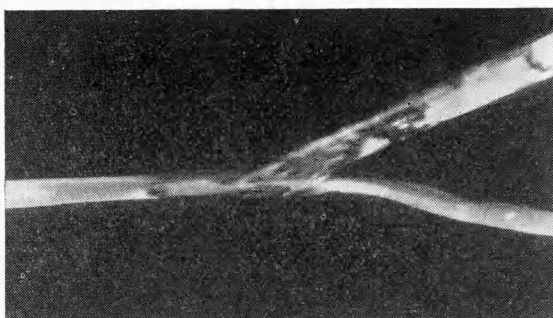
Экспериментальное распределение напряжений впереди растущей трещины сравнивалось с расчетным, полученным по методике, предложенной в работе [9]. Расчет проводился для скоростей, соответствующих экспериментально зарегистрированным. Сопоставление аналитических и экспериментальных результатов (см. ниже)

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

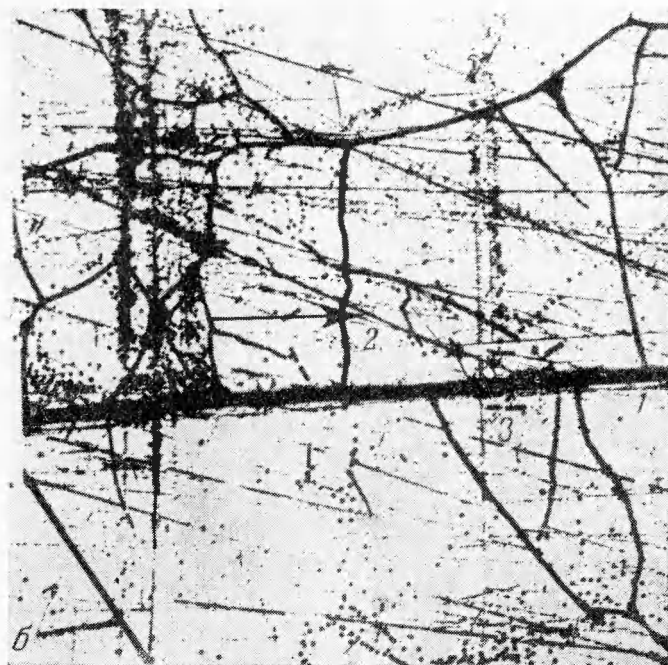
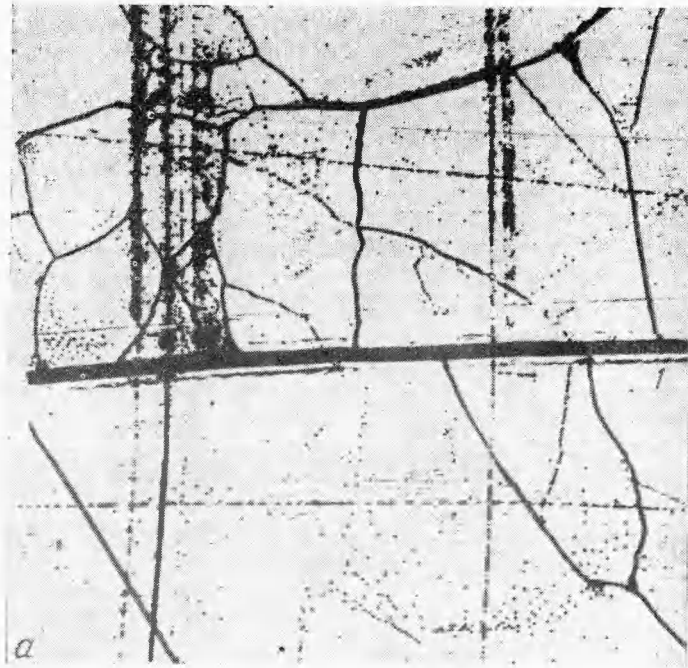
$$\Delta v/v = (v_0 - v')/v_0$$

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

