

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ХРУПКИХ ТРЕЩИН

В. И. Архипов, Л. А. Маслов

(Хабаровск)

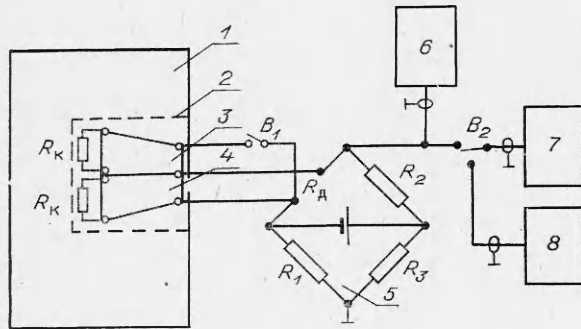
При исследовании динамических процессов, вызванных разрушением, необходимой частью эксперимента является измерение скорости роста трещины. Наиболее известными методами измерения являются: а) метод наклеенных проволочек (или других чувствительных элементов), работающих на разрыв, б) метод высокоскоростной фоторегистрации, в) метод модуляции ультразвуком фиксированной частоты, г) метод измерения электропотенциала, д) метод измерения электросопротивления наклеенных фольг, электропроводящей бумаги, клеев и т. д.

Методы наклеенных проволочек, киносъемки и модуляции ультразвуком по своей сущности дискретные. Поэтому их применение требует определенных априорных сведений о протекании исследуемого процесса. Уменьшение времени квантования приводит, как правило, к уменьшению количества отсчетов. Это обстоятельство, а также сложность, большая стоимость и громоздкость применяемой аппаратуры делает их в настоящее время не в полной степени пригодными для детального исследования таких быстропротекающих и в то же время сложных процессов, как развитие трещин. Кроме того, в методе ультразвуковой модуляции в область носика трещины вводится добавочная энергия, что, по-видимому, может влиять на характер ее движения.

Другие методы (измерения электропотенциала и электросопротивления) могут быть выполнены так, чтобы электрический сигнал, связанный с изменением длины трещины, был дискретным или аналоговым. Очевидно, для получения более полной информации о скорости развития трещины желательно получение сигнала в аналоговой форме. Недостатком метода электропотенциала является то, что здесь измерения могут быть проведены только на электропроводящих материалах, а требование повышения чувствительности заставляет применять высокую плотность тока, что приводит к изменению физико-механического состояния материала в носике трещины и сказывается на ее росте во времени. Желаемые результаты может дать метод измерения электросопротивления наклеенных датчиков, однако его наиболее существенным недостатком является неконтролируемое запаздывание разрыва чувствительного элемента по отношению к вершине трещины. Это вызвано тем, что толщина материала датчика на несколько порядков больше величины раскрытия трещины в области вершины, которая составляет несколько десятков ангстрем.

С целью устранения этих недостатков в данной работе в качестве чувствительного элемента применялась сверхтонкая пленка из электропроводящего материала, нанесенная в вакууме на поверхность исследуемого образца. Расстояние от распылителя до поверхности выбиралось таким, чтобы в области напыления получалась пленка, равномерная по толщине.

Толщина h пленки измерялась интерферометрическим способом и подбиралась из условия $h_1 < h < h_2$, где h_1 — минимальная толщина, при которой напыленный слой сохраняет свойства континуума (для меди $h_1 \approx (50-100)10^{-8}$ см [1]); h_2 — максимальная толщина, при которой пластическим деформированием напыленного слоя можно пренебречь. Экспериментальные оценки показали, что в данном случае $h_2 \approx \approx 600 \cdot 10^{-8}$ см. После напыления на образец 1 и контроля толщины пленки производился разрез напыленной области на две симметричные половины (фиг. 1). Одна половина образует рабочий датчик 4, вторая — калибровочный датчик 3. Здесь же показано включение датчиков в мостовую измерительную схему 5. При движении трещины сигнал $U(t)$ (U — электрическое напряжение, t — время) разбаланса поступает на вход запоми-



Ф и г. 1

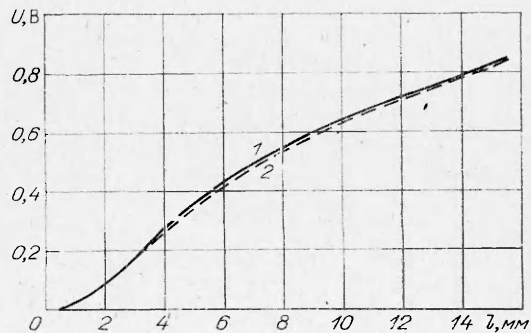
нающего осциллографа 7, запуск которого может производиться как внешний от разрыва специально напыленной полоски, так и внутренний от исследуемого сигнала. Предварительно (перед экспериментом) с целью повышения точности измерений производилась калибровка амплитуды и длительности развертки осциллографа с помощью генератора 8 типа Г5-15.

Цифровой вольтметр 6 типа Ф-4202 применяется для построения калибровочной кривой. Вся схема защищена от помех экраном 2. Резисторы R_K , материалом для которых служит сама пленка, применяются для коррекции характеристики датчиков.

Калибровочная кривая $U(l)$, где l — длина разрыва, полученного на датчике 3 надрезом напыленного слоя, используется для расчета $l(t)$ и $v(t)$ — скорости роста трещины. Кривые 1, 2, полученные на калибровочном и рабочем датчиках, показаны соответственно на фиг. 2. Максимальная относительная погрешность составляет +1%. Преимуществом описанного способа измерения скорости трещины является его значительная простота, точность и возможность детального изучения любой стадии процесса разрушения, что достигается выбором времени развертки, уровня чувствительности и уровня запуска осциллографа.

В качестве образцов для исследования применялись стеклянные пластинки размерами $14 \times 9 \times 0,14$ см. В центре одной из ее граней делался надрез глубиной 0,15 см и радиусом кривизны в вершине 0,01 см. Нагружение производилось термическим способом путем точечного ($\varnothing 0,15$ см) нагрева пластины с обеих сторон, причем нагревательные элементы располагались на расстоянии 0,05 см от поверхностей. Температура стекла в области термоэлементов составляла 50°C . Вследствие действия термических напряжений и концентрации их в вершине надреза происходил рост прямолинейной макроскопической трещины от надреза в точку нагрева, где ее движение останавливалось. Для получения скачка требовалось примерно три минуты нагрева. Приведенная методика дала возможность на порядок варьировать длину возникающих трещин, задавая ее установкой нагревательного элемента.

Образец как целое при таком способе нагружения, очевидно, не испытывает никаких поворотов и перемещений. Особенностью методики является сложный характер термоупругого поля напряжений. Эпюры напряжений $\sigma_0 = \sigma_*/\sigma_{*max}$, нормальных к оси разрыва, в последовательные моменты времени $t = 1, 2, 3$ мин (кривые 1—3 соответственно) приведены на фиг. 3. Напряжения рассчитывались по формулам [2], при



Ф и г. 2

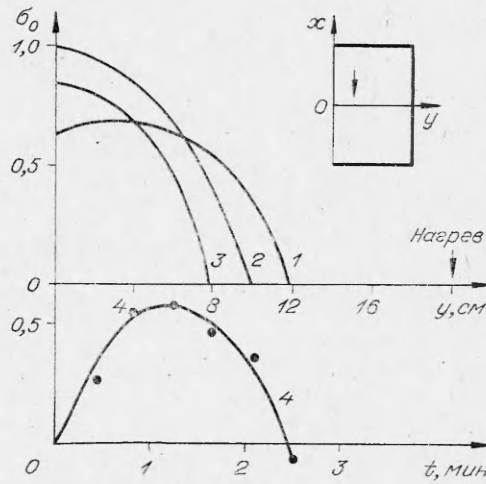
этом для учета влияния края пластины вводился симметричный относительно края фиктивный тепловой источник той же мощности. Кривая 4 на фиг. 3 — экспериментально измеренные значения σ_0 на расстоянии 8 мм от края как функция времени. Напряжения определялись с помощью кремниевых тензорезисторов КТД-1 с базой 2,5 мм. При измерениях учитывалось влияние нагрева датчиков на величину снимаемого сигнала.

На основе описанной методики было произведено более десяти измерений скорости v движения трещины. Типичные графики $v(t)$ показаны на фиг. 4. Здесь время отсчитывается от начала развертки

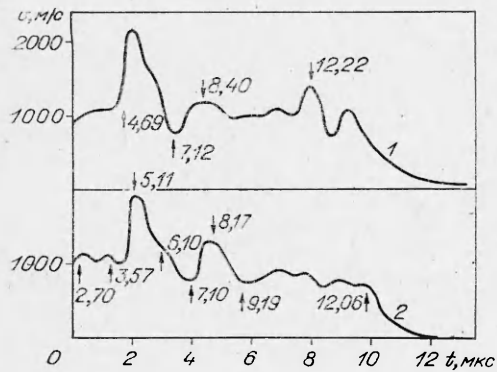
луча. Взятое при обработке экспериментальной аналоговой кривой время квантования $\tau = 0,5$ мкс не является пределом. С целью более детального исследования процесса возможно уменьшение τ . Кроме того, возможно привлечение аналоговых методов обработки сигнала. Приведенные результаты измерения скорости несколько отличаются от традиционно известных (см., например, результаты работы [3, 4]) прежде всего заметно выраженным скачкообразным характером ее роста. Как видно из фиг. 4, изменение скорости в 2 раза происходит менее чем за 0,5 мкс. Наблюдавшаяся во всех экспериментах максимальная величина скорости составляла $0,4 c_1$, где c_1 — скорость распространения продольных колебаний (для испытуемого материала $c_1 = 5,1$ мм/мкс). В литературе уже известны экспериментальные доказательства пульсации скорости трещины по величине [5, 6]. Однако выводы в этих работах основываются на сопоставлении смежных снимков кинограмм процесса.

В данной работе причины скачкообразного роста трещины остались до конца не выясненными (простой подсчет показал, что влияние волн, отраженных от боковых торцов пластины, параллельных линии разрыва, исключено). Наиболее реальными могут быть следующие: а) неоднородность статического поля термоупругих напряжений, предшествующего началу роста трещины, и его динамическая перестройка, б) зависимость энергии разрушения $\gamma_{эфф}$ от скорости трещины в том виде, например, как это показано в работе [7].

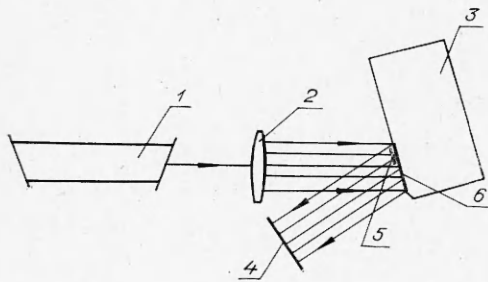
Как видно из фиг. 4, абсолютный максимум скорости (точки 4,69 и 5,11, числа означают длину трещины в миллиметрах от вершины надреза) находится в области растягивающих напряжений. Падение скорости связано с переходом вершины в область сжимающих напряжений (кривая 3 на фиг. 3). Следующий подъем



Фиг. 3



Фиг. 4



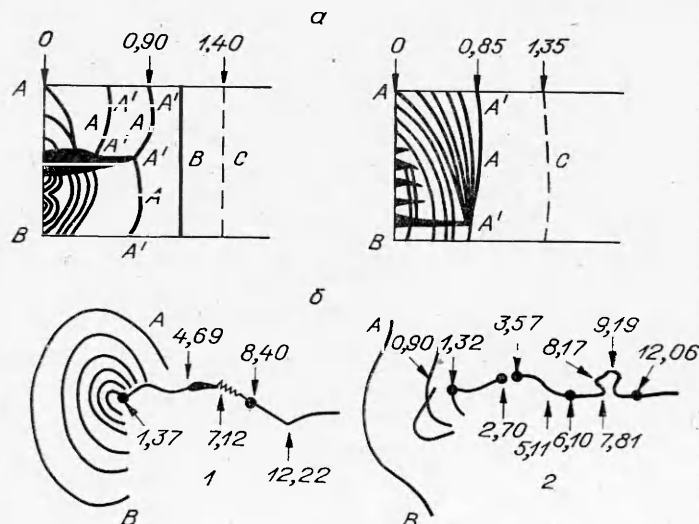
Фиг. 5

скорости (точки 7,12 и 7,10), как показал расчет, связан с приходом рэлеевской волны c_R из угловой точки пластины. Величина c_R взята равной $0,55 c_1$. При расчетах учитывалась глубина начального надреза, равная 1,5 мм. Дальнейший рост трещины происходит в области сжимающих напряжений с незначительными колебаниями скорости, которая на конечном этапе движения составляет 50—100 м/с. В этом случае меха-

низмом ее роста могут быть термофлуктуационные процессы, протекающие в вершине.

С целью качественной проверки результатов измерения скорости трещины и ее квазистабильного роста производилось изучение фрактограмм поверхности разрыва. Фрактографирование делалось двумя способами: путем прямого изучения поверхности на оптическом микроскопе МИМ-7 с увеличением в 100 раз и с помощью отраженного на экран от поверхности трещины светового луча He—Ne лазера ЛГ-75. Первый метод применялся для изучения начальной фазы — квазистабильного роста трещины, второй — для выявления характерных областей и точек на участке динамического движения вплоть до остановки. Эта методика основана на зависимости кривизны поверхности разрыва от скорости движения трещины, причем кривизна меняется как в направлении ее роста, так и по толщине пластины. Схема эксперимента показана на фиг. 5. Луч лазера 1, проходя через цилиндрическую линзу 2, падает на поверхность разрыва 6 половинки образца 3. Отраженный пучок падает на экран 4. Вдоль поверхности с помощью микрометрической подачи движется штorka с прямоугольным вырезом 5 шириной 0,5 мм. При этом прямолинейный участок на поверхности трещины, вырезаемый щелью, отображается в некоторую линию, определяемую кривизной этого участка.

На фиг. 6, а показаны фрактограммы, сделанные на оптическом микроскопе МИМ-7. Здесь отражена стадия докритического роста трещины.



Фиг. 6

Видно, что рост начинается из начальных дефектов среды (темные области), которые могли возникнуть, например, при резании стекла. Продвижение фронта трещины (кривая *A*) сдерживается точками закрепления *A'* на свободных поверхностях. Это может быть вызвано пластическим деформированием приповерхностных слоев материала. После того как фронт трещины выпрямляется, ее движение происходит в виде отдельных заметных скачков: линии *B* и *C*, причем линия *C* менее четко выражена, чем остальные. Наблюдения с помощью микроскопа на большем расстоянии от надреза не помогли выявить никаких других особенностей поверхности разрыва, что указывает на начало динамического роста трещины.

Результаты фрактографии, полученные вторым методом с помощью лазера, представлены на фиг. 6, б. Здесь кривые *1* и *2* (соответствующие кривым *1* и *2* на фиг. 4) — отображение на экран светового пучка от поверхности разрыва. Цифрами отмечено расстояние в миллиметрах линии, вырезаемой щелью *5* (см. фиг. 5) на этой поверхности от вершины надреза. Кривая *AB* соответствует передней кромке этой поверхности. Сужение отраженного светового пучка связано с уменьшением кривизны поверхности и переходом от «вязкого» разрушения к «хрупкому» (точки 1,37 и 1,32). Эти данные согласуются с наблюдениями под микроскопом (линии *C*, их расстояние от вершины надреза равно 1,40 и 1,35 мм).

На фрактограмме, соответствующей динамическому движению трещины, существуют участки повышенной яркости световой картины (на кривых *1* и *2* фиг. 6, б отмечены точками), участки разрыва луча и участки искривления его траектории. Первое связано с изменением кривизны поверхности в направлении движения трещины таким образом, что происходит фокусировка луча в точку — отрыв в виде плоской лунки. Во втором случае наблюдается картина, противоположная первой. Искривление траектории светового луча связано с поворотом вектора нормали к поверхности в плоскости, перпендикулярной к вектору скорости трещины. На кривых *1* и *2* (см. фиг. 4) характерные точки, выявленные на фрактограмме, указаны стрелками. Здесь видно, что результаты фрактографирования качественно отражают особенности роста трещины, измеренные предложенным в данной работе способом.

Таким образом, проведенное исследование можно рассматривать как доказательство возможности пульсации скорости роста трещины. Методики нагружения образцов и измерения скорости могут быть приняты в дальнейших экспериментальных исследованиях процессов, связанных с хрупким разрушением материалов.

Поступила 21 VI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика тонких пленок. Т. 2. М., «Мир», 1967.
2. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М., ГИФМЛ, 1963.
3. Wells A. A., Post D. The dynamic stress distribution surrounding a running crack. A photoelastic analysis.— «Proc. Soc. Experim. Stress Analysis», 1958, vol. 16, N 1.
4. Yoshiki M., Kanazava T., Itagaki H. An analysis of brittle-fracture propagation.— «Experim. Mech.», 1966, vol. 6, N 9.
5. Финкель В. М., Куткин И. А., Белоруков В. Ф. Ветвление трещин в стали.— ФММ, 1963, т. 15, вып. 5.
6. van Elst H. C., Korbee W. L., Verbraak C. A. On the mechanism of propagation of a brittle-fracture in steel.— «Trans. Metallurgical Soc. AIME», 1962, vol. 224.
7. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М., «Наука», 1975.