

УДК 539.375

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

В. П. Ефимов, Е. Н. Шер

Институт горного дела СО РАН, 630091 Новосибирск

Определена зависимость коэффициента интенсивности напряжений у вершины движущейся трещины в органическом стекле СО-120 от скорости ее развития  $K_I(v)$  в диапазоне  $10^{-5} \div 300$  м/с. Отмечены характерные особенности движения трещины, связанные с видом кривой  $K_I(v)$ , имеющей разрывы и интервалы нарушения однозначности.

Хрупкое разрушение твердых сред развивающимися трещинами имеет место во многих технологических процессах горного дела, в частности при контурном взрывании, дроблении горных пород взрывом, гидроразрыве, механическом разрушении. Большое влияние оно оказывает и на сохранность конструкций и сооружений. При хрупком разрушении в инженерной практике в качестве характеристики трещиностойкости материала используют критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации  $K_{Ic}$ . Рост трещины начинается, когда коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  превышает критический:  $K_I > K_{Ic}$ . Параметр  $K_{Ic}$  определяется по моменту старта трещины. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от скорости трещины  $K_I(v)$  (динамическая кривая трещиностойкости) в рамках линейной механики разрушения полностью характеризует сопротивление росту трещины выбранного материала при постоянных температуре и влажности.

Экспериментальное определение полной динамической кривой  $K_I(v)$  сопряжено со многими трудностями, поэтому на практике часто применяют упрощенный анализ, используя минимальное значение  $K_{Im}$  зависимости  $K_I(v)$  в качестве критерия остановки или роста трещины. При  $K_I < K_{Im}$  трещина не движется. Значение  $K_{Im}$  может быть не равным  $K_{Ic}$ . Исследования динамических трещин в режиме старт — остановка [1] позволяют сделать вывод, что для некоторых материалов значение  $K_{Im}$  равно значению коэффициента интенсивности напряжений в момент остановки трещины  $K_{Ia}$  и в то же время меньше  $K_{Ic}$ . Используя этот критерий, можно предсказать, в каком месте остановится трещина при данных условиях. Однако рассчитать движение трещины во времени, а следовательно, параметры разрушения или ресурс конструкции без знания полной кривой  $K_I(v)$  невозможно. Поэтому определение полной динамической кривой трещиностойкости для различных горных пород и конструкционных материалов является важной практической задачей. В настоящее время такие исследования проводятся оптическими методами для ряда прозрачных материалов, используемых и для моделирования хрупкого разрушения. Таким модельным материалом является органическое стекло полиметилметакрилат (ПММА). Определению его трещиностойкости посвящены работы [2–6]. В [2–5] исследованы медленные трещины в скоростном диапазоне от  $10^{-7}$  до  $10^{-2}$  м/с. Данные о трещиностойкости в диапазоне скоростей движения трещин от 100 до 600 м/с представлены в [6]. Авторы работы [6] дополнили эти данные значениями трещиностойкости в диапазоне скоростей

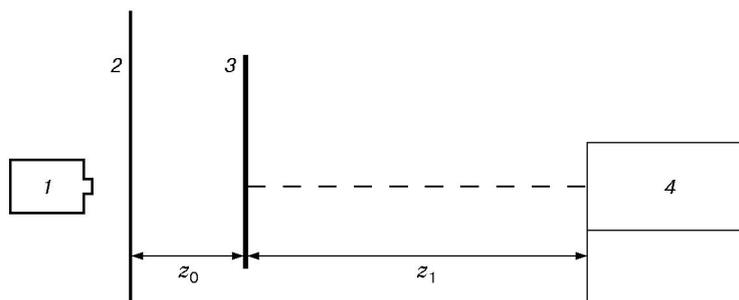


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — видеочкамера или фотоаппарат, 2 — экран, 3 — образец, 4 — источник света ((He-Ne)-лазер или искровой стробоскоп)

медленных трещин из [4, 5]. Полученную таким образом кривую трещиностойкости необходимо уточнить, поскольку в [6] не указано, на одном ли материале выполнены испытания для медленных и быстрых трещин. ПММА — широкий класс однотипных пластиков, различающихся по составу и механическим свойствам. В [6] это обстоятельство не обсуждается. Характер полученной кривой трещиностойкости ПММА довольно сложный. Она отличается отсутствием монотонности и наличием скачков. На кривой имеется диапазон скоростей, для которого отсутствуют данные о существовании движущихся трещин. Действительно, насколько можно судить по литературным данным, в образцах из ПММА не наблюдалось движения трещин в диапазоне скоростей от 10 см/с до 80 м/с.

Целью данной работы является определение на одном и том же материале (промышленное органическое стекло СО-120 из класса ПММА) полной кривой трещиностойкости, а также уточнение особенностей движения трещин в указанном выше диапазоне скоростей их развития.

**Измерение трещиностойкости.** Определение коэффициентов интенсивности напряжений проводилось теневым методом [7] по формуле

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3z_0 t_0 c} \frac{1}{\lambda^{3/2}} \left(\frac{D}{\delta}\right)^{5/2},$$

где  $D$  — диаметр каустики, регистрируемой на экране;  $z_0$  — расстояние от объекта до экрана;  $t_0$  — толщина образца;  $c$  — константа материала, определяемая оптическими и механическими свойствами;  $\lambda$  — увеличение оптической схемы эксперимента, определяемое свойствами источника света и расстояниями  $z_0$  и  $z_1$  (рис. 1);  $\delta$  — числовой коэффициент. Для регистрации теневых фигур использовался фотоаппарат при подсветке искровым стробоскопом с перестраиваемой скважностью либо видеочкамера. Такая схема регистрации (рис. 1) позволяла определять положение трещины и коэффициент интенсивности напряжений для трещин, движущихся со скоростью до 200 м/с. Трещиностойкость оргстекла СО-120 при скоростях 100 м/с и выше определена в [8]. Для регистрации медленных трещин использовалась видеосъемка процесса разрушения образца, освещаемого непрерывно. Скорости трещин, хорошо регистрируемые обычной видеочкамерой, находятся в диапазоне от  $10^{-4}$  до 1 м/с. Таким образом, применяемая техника съемки позволяла регистрировать распространяющиеся трещины практически во всем интересующем диапазоне скоростей. Погрешность измерения коэффициентов интенсивности напряжений теневым методом составляла 5%.

При выборе схемы нагружения и формы образцов основным требованием являлось плавное изменение коэффициента интенсивности напряжений на большом участке траектории трещины. Для регистрации трещиностойкости методом остановки желательно

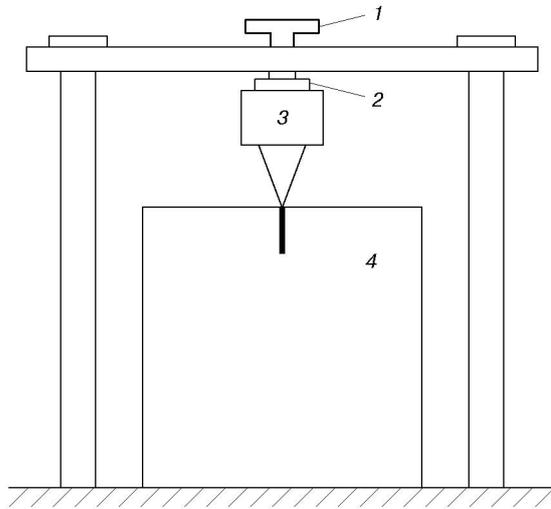


Рис. 2

Рис. 2. Схема нагружения:

1 — нагрузочный винт, 2 — упругий элемент, 3 — клин, 4 — образец

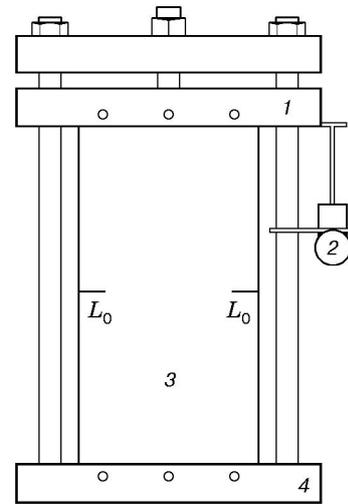


Рис. 3

Рис. 3. Схема растяжения образца с краевыми разрезами:

1 — подвижный захват, 2 — индикатор перемещения, 3 — образец, 4 — неподвижный захват

наличие монотонно убывающей зависимости  $K_I(l)$ . Для исследования переходного режима от медленной трещины к быстрой необходима плавно возрастающая ветвь кривой  $K_I(l)$ . Важным условием повторяемости экспериментов является стабильность траектории трещины. В экспериментах с одним типом образцов удовлетворить всем указанным требованиям оказалось невозможно, поэтому использовались два вида нагружения: расклинивание компактного образца с трещиной (схема 1) (рис. 2) и растяжение образца с двумя краевыми разрезами (схема 2) (рис. 3). Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины  $K_I(l)$  при расклинивании квадратного образца, нагруженного клином с углом раствора  $45^\circ$  с усилием  $10^4$  Н/м при значении коэффициента трения клина об оргстекло  $\mu = 0,12$ , представлена на рис. 4 [9]. На кривой имеется линейно возрастающий участок в средней части образца. Испытания, проводимые по этой схеме, позволяли, изменяя жесткость упругого элемента, получать различные скоростные режимы движения трещины: от ускоряющегося при постоянной силе до замедляющегося при жестком нагружении. Расклинивание образцов на испытательной машине УМЭ-10Т проводилось при постоянной скорости внедрения клина. При этом не выполнялось условие плавного изменения  $K_I(l)$ , и трещина двигалась скачками. Большой выбор скоростей подачи траверсы испытательной машины позволил расширить скоростной диапазон медленных трещин. Для более детального изучения перехода медленного разрушения в быстрое использовалась схема 2. Расчетная зависимость коэффициента интенсивности напряжений  $K_I(l)$  в вершине растущей трещины при неподвижной второй приведена на рис. 5 для случая постоянного удлинения образца.

**Методика эксперимента.** Испытания образцов размером  $100 \times 100 \times 10$  мм по схеме 1 проводились нагружением стальными клиньями с углами раствора при вершине  $30$  и  $45^\circ$ . Изучение медленных трещин со скоростью развития менее  $1$  см/с проводилось при статическом нагружении образцов (см. рис. 2). Упругий элемент из вакуумной резины диаметром  $30$  мм и толщиной  $5$ – $10$  мм позволял получать слабоубывающую зависимость ко-

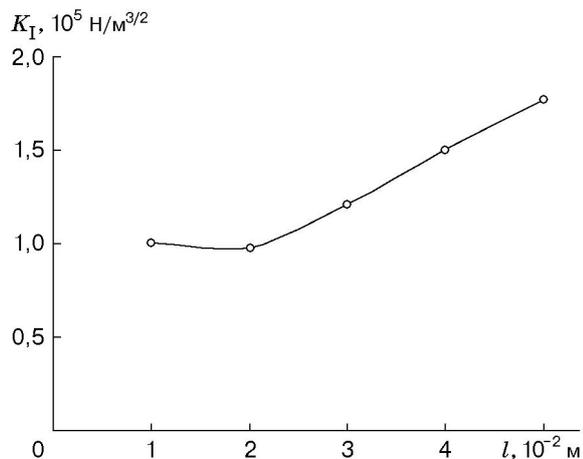


Рис. 4

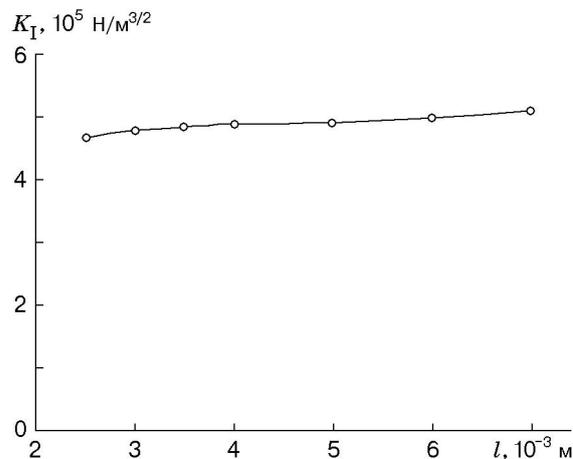


Рис. 5

Рис. 4. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  от длины трещины  $l$  для компактного образца размером  $10 \times 10$  см, нагруженного клином с углом раствора  $45^\circ$  с усилием  $10^4$  Н/м

Рис. 5. Расчетная зависимость коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  для образца с двумя краевыми разрезами от длины одного из разрезов (размер образца  $10 \times 20$  см, начальная длина разрезов  $l_0 = 2,5$  см, растяжение  $0,2$  мм)

коэффициента интенсивности напряжений  $K_I(l)$  в средней части образца. Образец имел пропилен по линии симметрии, заканчивающийся либо острым кончиком, либо трещиной, что позволяло менять начальный скоростной режим трещины. Для наблюдения более быстрых трещин образец нагружался теми же клиньями на испытательной машине УМЭ-10Т. Для исследования трещин в режиме торможения и остановки, скорость которых составляла менее  $100$  м/с, использовалось динамическое нагружение клином, падающим с малой высоты, так чтобы он не раскалывал образец полностью.

Испытания образцов на разрывном устройстве с фиксированным удлинением по схеме 2 проводились с целью изучения перехода от медленного движения трещины к быстрому при постоянном коэффициенте интенсивности напряжений  $K_I$ . В плоском образце размером  $120 \times 240 \times 4$  мм, закрепленном в зажимах устройства, были пропилены два симметричных разреза. На продолжении одного из них прорастивалась начальная трещина. Длина пропилов с учетом начальной трещины на каждом образце была одинаковой и изменялась от образца к образцу в пределах  $24\text{--}30$  мм. Для измерения скорости трещин на образце поперек направления ее движения были наклеены циакрином тонкие медные проволочки диаметром  $0,02$  мм с шагом  $2$  мм на расстоянии  $2$  мм от вершины начальной трещины до ближайшей проволочки. Разрыв проволочек фиксировался на осциллографе С8-9. Растяжение образца измерялось индикатором часового типа с погрешностью  $0,005$  мм.

**Эксперименты и результаты.** При испытаниях по схеме 1 (см. рис. 2) квадратный образец нагружался клином путем закручивания нагрузочного винта через упругий элемент. Теневая картина разрушения от старта трещины до развала образца на проекционном экране снималась видеокамерой. Перед испытаниями в образце на продолжении пропила создавалась зародышевая трещина, с которой начинался старт магистральной трещины. При зародыше, близком по форме к плоскому идеальному разрезу, трещина начинала движение при невысоком напряжении и плавно пробегала практически весь образец. Использование образцов без зародыша с острым пропилом давало возможность повы-

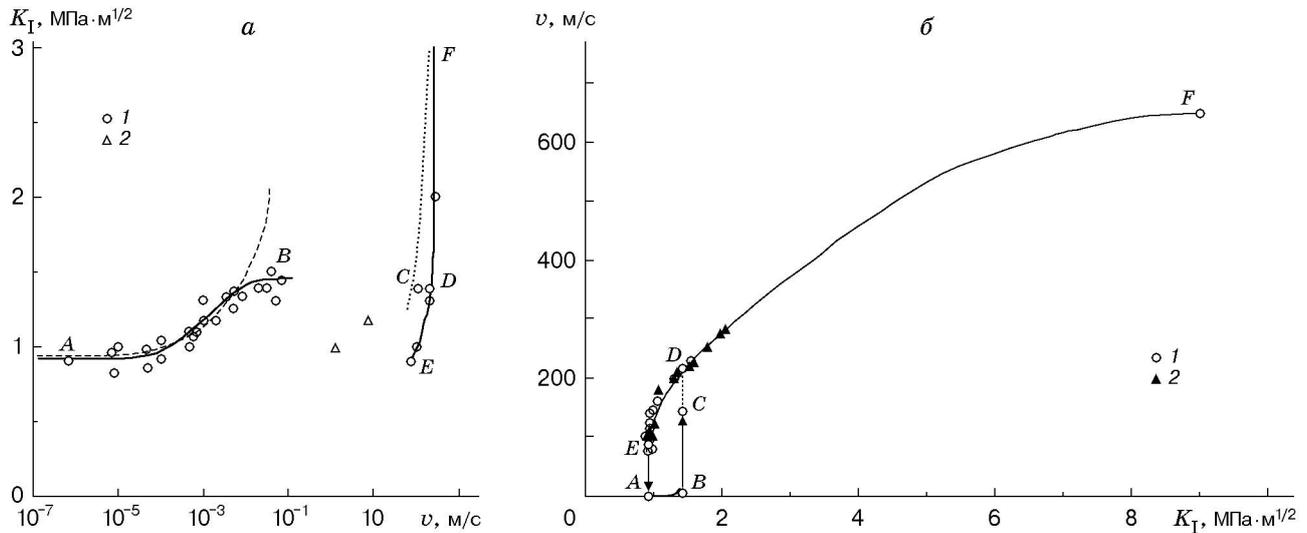


Рис. 6. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от скорости трещины для образца из ПММА (точки — экспериментальные данные, линии — осредненные данные): *a* — сплошные линии, точки 1 — данные настоящей работы; штриховая линия, точки 2 — данные [4, 5], пунктирная линия — данные [6]; *б* — 1 — ускоряющиеся трещины; 2 — замедляющиеся трещины; сплошная линия — данные [6]

сать начальную скорость трещины. В этом случае движение трещины по всему образцу происходило со значительными изменениями скорости, но видеосъемка позволяла выделять характерные участки на образце, где движение трещины было квазистационарным. Эти участки с различными скоростными режимами хорошо видны при фрактографическом анализе обломков. Таким образом, испытания каждого образца позволяли определять от одной до нескольких точек на динамической кривой трещиностойкости.

Экспериментальные значения коэффициента интенсивности напряжений при различных скоростях распространения трещины представлены на рис. 6, *a*. С использованием нагружающего устройства (см. рис. 2) удалось зафиксировать трещины в скоростном диапазоне до 1 см/с. Эксперименты на испытательной машине УМЭ-10Т почти не отличались от описанных выше, но позволили расширить исследованный диапазон скоростей развития трещин до 5 см/с при регистрации видеокамерой. В основном при испытаниях на машине продвижение трещины состояло из ряда скачков, причем только некоторые из них можно было расшифровать при просмотре. Если бы движение трещины было равномерным за время одного кадра, то получающаяся в эксперименте скорость достигала бы значения 0,8 м/с. Однако на пленке имелись кадры, на которых фиксировались сразу два положения трещины. Из сопоставления видеозаписи и результатов фрактографического анализа обломков следует, что первое положение трещины соответствует ее старту, второе — остановке. Это позволяет сделать следующее предположение относительно характера движения трещины: после достижения некоторой предельной скорости трещина совершает скачки, во время которых скорость большая, а зарегистрированные положения трещины соответствуют ее остановкам на короткое время. Такие остановки иногда приходится на один кадр, но чаще всего на соседние. Регистрируемые при этом каустики имеют достаточно четко выраженную структуру. Диаметр каустик перед скачком на 10–15% больше, чем в момент остановки, при этом различие коэффициентов интенсивности напряжений составляет примерно 30–40%. Четко зафиксированная видеокамерой стационарная скорость перед скачком для СО-120 составляет 5 см/с, соответствующий ей

коэффициент интенсивности напряжений —  $1,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 10\%$ . Съемка видеокамерой не позволила зафиксировать переходные режимы движения трещины от стационарного медленного к быстрому и, наоборот, от быстрого к остановке.

Для выяснения характера движения трещины во время скачков и исследования переходных режимов применялась съемка в свете искрового стробоскопа. Каустики фиксировались фотоаппаратом методом наложения на один кадр. Калибровка новой схемы освещения и регистрации каустик проводилась на медленно движущейся со скоростью порядка  $1 \text{ мм/с}$  трещине. На образец наклеивалась тонкая проволочка, разрыв которой давал синхроимпульс для запуска стробоскопа. Нагружение осуществлялось падающим с небольшой высоты клином, так чтобы трещина останавливалась, пройдя  $1\text{--}3 \text{ см}$ . В этих экспериментах не удалось уточнить скорость перехода от медленного распространения трещины к быстрому, но были получены данные о трещинах в режиме торможения, минимальная скорость которых составила  $75 \text{ м/с}$ . Коэффициент интенсивности напряжений для трещин, движущихся со скоростью  $75 \text{ м/с}$ , имел наименьшее значение, равное  $0,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Погрешность измерения коэффициентов интенсивности напряжений составляла  $5\%$ , статистический разброс —  $10\%$ . Во многих экспериментах фиксировались временные остановки трещин. Коэффициент интенсивности напряжений для остановившихся трещин  $K_{Ia}$  был равен  $0,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , как и при скорости  $75 \text{ м/с}$ . При выбранном способе нагружения клином как при статических, так и при динамических испытаниях не удалось зафиксировать развитие трещин в режиме торможения со скоростями менее  $75 \text{ м/с}$ .

Была предпринята попытка уточнить данные о скорости трещин на образцах с нанесенной проволоочной сеткой, фиксирующей положение трещины с шагом  $2 \text{ мм}$ . Такая методика позволяет вычислить только среднюю скорость между проволочками. В промежутках между проволочками, в которых трещина останавливалась, скорость была низкой, но эти промежутки хорошо определялись при фрактографическом анализе. Полученные значения скоростей не учитывались. Подобную картину корреляции участков с низкой скоростью с отметками, соответствующими остановке трещины, наблюдали авторы [10]. Данные, полученные в результате этих экспериментов, подтверждают, что минимальная скорость равна  $75 \text{ м/с}$ . В экспериментах с использованием высокоскоростной съемки на скоростном фоторегистраторе СФР-1 [11] также не зафиксировано движение трещин в режиме торможения со скоростями ниже  $75 \text{ м/с}$ , хотя геометрия образцов и способ нагружения в этом случае были иными. Таким образом, при постоянном значении  $K_I$ , равном минимальному значению, трещина двигалась с остановками. Во время движения скорость ее составляла  $75 \text{ м/с}$ .

Исследование переходного режима движения трещины от медленного к быстрому проводилось на образцах, растягиваемых на жестком разрывном устройстве (схема 2). При таком способе нагружения коэффициент интенсивности напряжений для распространяющейся трещины оставался практически постоянным, поэтому трещина двигалась с небольшой скоростью практически через весь образец. Переходный режим осуществлялся дополнительной небольшой деформацией образца после начала движения трещины. В этом случае трещина сначала медленно двигалась с небольшим ускорением на промежутке порядка  $1 \text{ см}$ , а затем скачком переходила в динамический режим со скоростью более  $100 \text{ м/с}$ . При изучении таких явлений основная трудность состоит в невозможности регистрации всего процесса осциллографом. Широкий диапазон скоростей от  $10^{-2} \text{ м/с}$  на начальном этапе до  $10^2 \text{ м/с}$  при динамическом развитии, а также разброс значений момента перехода от одного режима к другому приводят к тому, что при малой скорости развертки осциллографа для фиксирования начального этапа невозможно выполнить измерения при быстром распространении трещины. Избежать этого можно, используя два осциллографа, один из которых запускается от первой проволочки сеточного датчика с длинной разверткой, а

другой — от последней проволоочки в режиме предзаписи. Развертка второго осциллографа подбиралась так, чтобы можно было четко регистрировать динамический режим движения трещины.

Проведя серию испытаний по схеме 2, удалось уточнить детали переходного процесса. Для выбранной геометрии на участке медленного движения трещина постепенно ускоряется до скорости 20 см/с, затем скачком переходит в динамический режим с начальной скоростью 140 м/с. Дальнейшее ее поведение зависит от условий нагружения.

По результатам проведенных экспериментов построена динамическая кривая трещиностойкости СО-120 с использованием логарифмической (рис. 6,а) и линейной (рис. 6,б) шкалы скорости. Кривая состоит из трех ветвей: ветвь  $AB$  соответствует медленно распространяющимся трещинам,  $BCD$  — только ускоряющимся,  $EDF$  — ускоряющимся и замедляющимся трещинам. На кривой имеется ряд характерных точек: в точке  $A$  коэффициент интенсивности напряжений имеет минимальное значение  $K_I = 0,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , соответствующее началу распространения медленных трещин; в точке  $B$  скорость медленного движения трещины максимальна ( $v = 0,2 \text{ м/с}$ ,  $K_I = 1,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ );  $C$  — точка начала быстрого распространения трещины ( $v = 140 \text{ м/с}$ ,  $K_I = 1,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ); в точке  $E$  скорость и коэффициент интенсивности непосредственно перед остановкой трещины  $v = 75 \text{ м/с}$ ,  $K_I = 0,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ; в точке  $D$  ( $v = 200 \text{ м/с}$ ,  $K_I = 1,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) происходит слияние ветвей  $BCD$  и  $EDF$ .

На рис. 6 приведены также кривые трещиностойкости ПММА, полученные в [4–6]. Основное их отличие от кривых, полученных в данной работе, состоит в следующем: коэффициент интенсивности напряжений непосредственно перед остановкой трещины  $K_{Ia}$  (точка  $E$ ), по данным настоящей работы, является минимальным не только для динамической ветви кривой, но и для всей кривой трещиностойкости, т. е. минимум динамического коэффициента интенсивности напряжений практически совпадает со значениями трещиностойкости очень медленных трещин. Наличие трещин со скоростями в диапазоне от 0,2 до 75 м/с не подтверждается проведенными исследованиями. По-видимому, приведенные в [4, 5] данные о скоростях распространения трещин являются осредненными, без учета мгновенных остановок. Незначительные количественные различия между данными [4–6] и значениями трещиностойкости в настоящем исследовании объясняются тем, что каждая кривая была определена для различных материалов из класса ПММА.

**Обсуждение результатов.** Для полученной скоростной зависимости трещиностойкости движение трещины имеет ряд особенностей. На интервалах движения, где  $dK_I/dl > 0$ , скорость трещины постоянно растет. Разрыв полосы с краевой трещиной при постоянно нарастающем напряжении является примером, в котором данное условие выполняется. В таких условиях трещина неустойчива и обычно после старта, ускоряясь, раскалывает образец. В качестве примера приведем результаты разрыва образца из оргстекла СО-120 с размерами  $120 \times 240 \text{ мм}$  с краевой начальной трещиной длиной 28 мм. Получена следующая картина разрушения: трещина начала медленно двигаться при значении  $K_I = 0,93 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ; затем, ускоряясь, подросла до размера 43 мм и перешла в режим быстрого распространения. Коэффициент интенсивности напряжений в момент срыва трещины (перехода в режим быстрого распространения) имел значение  $K_I = 1,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Время медленного распространения трещины в данных условиях составило 15 с. На фазовой плоскости в координатах  $(K_I, v)$  движение трещины происходило следующим образом: по кривой трещиностойкости соответствующая движению трещины фазовая точка перемещалась от точки  $A$  до точки  $B$  (рис. 6,а). Затем трещина перешла в динамический режим, и ее скорость скачкообразно увеличилась до значения, соответствующего точке  $C$ . Далее трещина ускорялась, и ее фазовая точка перешла на ветвь  $DF$  кривой трещиностойкости (рис. 6,б).

Если условия нагружения таковы, что на определенном участке траектории трещины  $dK_I/dl < 0$ , она начинает тормозиться. Соответствующая движению трещины фазовая точка перемещается по ветви  $FE$  влево (рис. 6,б) и достигает точки  $E$ , где трещина останавливается. По нашим наблюдениям, если после остановки трещины  $K_I$  уменьшается, а затем начинает увеличиваться, то возможно новое развитие трещины. Для оргстекла СО-120 оказалось, что если время покоя трещины достаточно мало (менее 5 мкс), то возобновление движения происходит со скоростями, соответствующими ветви  $ED$  кривой трещиностойкости. На рис. 6,б приведены экспериментальные значения трещиностойкости ускоряющихся и тормозящихся трещин. Видно, что ветвь  $EF$  соответствует как ускоряющимся, так и замедляющимся трещинам, а ветвь  $BD$  — только ускоряющимся. Из изложенного выше следует, что в начале разрушения точка, соответствующая движению трещины, не может оказаться на ветви  $EDF$ , минуя ветви  $AB$  и  $BD$ . Подобное поведение трещин отмечено в [12, 13] для некоторых видов эпоксидных полимеров.

Экспериментально найденная зависимость трещиностойкости материала от скорости распространения трещины используется при расчетах динамики хрупкого разрушения. Для оргстекла в [14] предложена зависимость  $K_I(v)$  в виде

$$v = V_0[1 - \exp(1 - K_I/K_{Ic})], \quad (1)$$

где  $V_0 = 650$  м/с;  $K_{Ic} = 1,2$  МПа · м<sup>1/2</sup>. Использование ее для описания разрушения при быстром нагружении хрупкой среды взрывом или ударом дало удовлетворительные результаты. В этом случае рост трещин на этапе медленного развития достаточно мал. Для построения кривой  $K_I(v)$  существенным является приведенное выше уточненное значение коэффициента интенсивности напряжений при остановке  $K_{Ia} = 0,9$  МПа · м<sup>1/2</sup> (точка  $E$  на рис. 6,а), а не значение  $1,2$  МПа · м<sup>1/2</sup>, определенное согласно (1). В целом зависимость  $K_I(v)$  (рис. 6,б) можно упрощенно представить в аналитическом виде кусочно-гладкой функцией

$$\begin{aligned} v &= V_0 \exp \alpha(K/K_0 - 1) && \text{при } 0 < v < 0,2 \text{ м/с (ветвь } AB), \\ v &= V_1[1 - \exp \beta(1 - K/K_D)] && \text{при } v > 75 \text{ м/с (ветвь } EF). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $V_0 = 10^{-5}$  м/с;  $K_0 = 1,4$  МПа · м<sup>1/2</sup>;  $K_D = 0,6785$  МПа · м<sup>1/2</sup>;  $\alpha = 16,57$ ;  $V_1 = 670$  м/с;  $\beta = 0,268$ .

При расчетах с использованием (2) необходимо учитывать историю развития трещины и знак ее ускорения.

Аппроксимация (2) была использована для оценки длины трещины  $L_1$  перед ее быстрым ростом в приведенном выше примере разрыва образца с краевой трещиной. В расчетах  $L_1 = 43$  мм, что близко к значению, полученному в эксперименте.

**Выводы.** Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

Зависимость  $K_I(v)$  для ПММА имеет три ветви: ветвь медленных трещин, ветвь только ускоряющихся быстрых трещин и ветвь ускоряющихся и замедляющихся быстрых трещин.

Определены особенности развития трещины при ее ускорении и торможении. В начале разрушения трещина обязательно находится в стадии медленного развития и скачком переходит на ветвь разгона с большими значениями  $K_I$ .

Предложена аналитическая аппроксимация найденной экспериментальной зависимости  $K_I(v)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кросли П., Риплинг Э.** Особенности движения трещины на участке старт — остановка // Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин. Сер. Новое в зарубеж. науке. Механика. М.: Мир, 1981. Вып. 25. С. 74–100.
2. **Вавакин А. С., Салганик Р. Л.** Исследования трещиностойкости органического стекла // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1971. № 4. С. 167–175.
3. **Алешин В. И., Аэро Э. Л., Кувшинский Е. Б., Славицкий И. А.** Кинетика роста трещин в пластинах из оргстекла // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1981. № 2. С. 70–79.
4. **Williams J. G., Radon J. C., Turner C. E.** Desinging against fracture in brittle plastics // J. Polymer Engng Sci. 1968. V. 8, N 2. P. 130–139.
5. **Williams J. G.** Visco-elastic and thermal effects on crack growth in PMMA // Intern. J. Fracture Mech. 1972. V. 8. P. 393–398.
6. **Green A. K., Pratt P. L.** Measurement of the dynamic fracture toughness of the polymethylmethacrylate by high speed photography // Engng Fracture Mech. 1974. V. 6, N 1. P. 71–80.
7. **Теокарис П. С.** Локальное течение вблизи вершины трещины в плексигласе // Прикл. механика. 1970. № 2. С. 159–165.
8. **Ефимов В. П.** Динамическая калибровка измерения трещиностойкости хрупких материалов методом расклинивания // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1990. № 4. С. 89–93.
9. **Ефимов В. П., Мартынюк П. А., Шер Е. Н.** Учет вертикальных сил при расклинивании // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1992. № 3. С. 32–36.
10. **Колгтон Дж., Дентон Б.** Измерение быстрого роста трещин в металлах и неметаллах // Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин. Сер. Новое в зарубеж. науке. Механика. М.: Мир, 1981. Вып. 25. С. 174–198.
11. **Шер Е. Н.** Исследование динамики развития трещин методом фотоупругости // ПМТФ. 1974. № 6. С. 150–158.
12. **Кобояши Т., Делли Д.** Зависимость между скоростью трещины и коэффициентом интенсивности напряжений в полимерах с двойным лучепреломлением // Механика разрушения. Быстрое разрушение и остановка трещин. Сер. Новое в зарубеж. науке. Механика. М.: Мир, 1981. Вып. 25. С. 101–119.
13. **Кашеварова Н. И., Шер Е. Н.** Экспериментальное исследование торможения трещины в оптически активном эпоксидном материале // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1983. № 3. С. 182–185.
14. **Шер Е. Н.** Пример расчета движения радиальных трещин, образующихся при взрыве в хрупкой среде в квазистатическом приближении // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1982. № 2. С. 40–42.

*Поступила в редакцию 8/XII 2000 г.,  
в окончательном варианте — 26/II 2001 г.*

---