

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

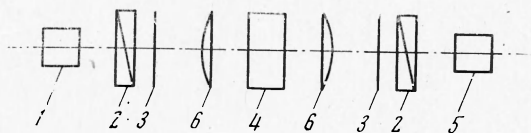
Е. Н. Шер

(Новосибирск)

В работе проводится экспериментальное исследование процесса развития трещин в двух материалах: полиметилметакрилате и заполимеризованной эпоксидной смоле. Для этих материалов находятся их оптические и механические характеристики, такие как плотность, скорости звука, критическое значение коэффициента особенности поля напряжений в носике трещин. В качестве динамической характеристики процесса развития трещин исследуются зависимости, связывающие коэффициенты особенности поля напряжений в носике движущейся трещины и скорость развития трещины. Рассматривается вопрос взаимодействия двух трещин, движущихся в предварительно растянутом образце.

Методы фотоупругости широко применяются для исследования статических и динамических полей напряжения и деформаций в упругих телах. В частности, эти методы используются для изучения процесса развития трещин [1, 2].

Зависимости, связывающие коэффициенты особенности поля напряжений в носике движущейся трещины и скорость развития трещины, замыкают систему уравнений движения трещины [3], поэтому их экспериментальное исследование является весьма важным.



Фиг. 1

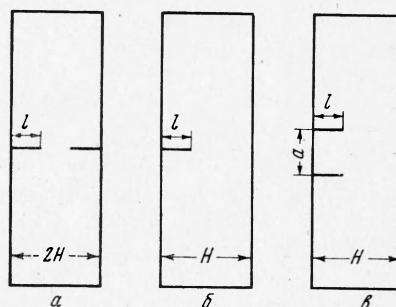
1. Методика эксперимента. В экспериментах использовалась обычная схема поляризационно-оптической установки [4], условно изображенная на фиг. 1. Ее основными частями были осветительное устройство 1, поляризаторы 2, четвертьволновые пластинки 3, разрывное устройство 4, объективы 6.

В осветительном устройстве при статических испытаниях использовалась лампа накаливания, при динамических испытаниях — импульсная лампа ИФП-1000-2А. Объективы позволяли создать на рабочем участке параллельный пучок света диаметром 100 мм. Свет пропускался через интерференционный фильтр Ва55J на 557 нм.

В качестве съемочного устройства в зависимости от характера эксперимента, использовались фотоаппарат «Пентазет», кинокамера «Конвас», скоростная камера СФР. Разрывное устройство позволяло статически растягивать прямоугольные плоские образцы, при этом можно было фиксировать растягивающие усилия и удлинение образца. Устройство зажимов обеспечивало зажатие образца по всей длине зажимаемых кромок без перекоса, что проверялось на образцах с симметрично расположенными надрезами (фиг. 2, а).

При растяжении образца перекося подвижного зажима фиксировался. Описанные в данной работе эксперименты проводились при нулевом перекося подвижного зажима.

Запуск трещины в предварительно растянутый образец при динамических испытаниях производился с помощью электробойка, приводящего в движение нож, надкалывающий образец. Конструкция электробойка аналогична описанной в [5]. Электробоек срабатывал от синхронизованного с СФР разряда батареи конденсаторов (12 мкф, 25 кВ). В экспериментах, где фиксировалось движение двух трещин, использовались два электробойка, соединенные последовательно. В этом случае задержку развития одной из трещин можно было создавать за счет регулируемого зазора между ножом и кромкой образца. Импульсная лампа ИФП-1000-2А работала от батареи конденсаторов емкостью 700 мкф и напряжением 1.5 кВ. Поджиг лампы производился от задержанного импульса СФР. Для задержки использовался генератор Г5-15.



Фиг. 2

В экспериментах использовались прямоугольные образцы размером $50 \times 150 \text{ мм}^2$. Толщина образцов изменялась в пределах 2.8—4.5 мм. Геометрия надрезов или трещин в разных сериях была различной. На фиг. 2 представлены используемые в работе конфигурации. Испытания проводились на образцах из листового полиметилметакрилата и затвердевшей эпоксидной смолы. Пластины из эпоксидной смолы изготовлялись полимеризацией ЭД-5 с малеиновым ангидридом. В качестве форм использовались стеклянные пластины, обработанные диметилдихлорсиланом по методике Лаборатории исследования напряжений МИСИ.

Механические и оптические свойства используемых материалов приведены в таблице, где ρ — плотность, C_p , C_s — скорости продольных и поперечных волн в пластине, ν — коэффициент Пуассона, E_s , E_d — статический и динамический коэффициенты Юнга, σ_0 — статическое значение оптической постоянной материала. Величины $E_{d,\nu}$ определялись по значениям ρ , C_p , C_s , которые находились из кинограмм распространения волн от взрыва заряда азида свинца, расположенного на грани пластины. В таблице приведены средние значения указанных величин, отклонения от которых в конкретных образцах могли доходить до 10%.

Материал	ρ , г/см ³	C_p , м/сек	C_s , м/сек	ν	E_s , кг/см	E_d , кг/см ²	σ_0 , (кг/см ²)/см/полос
Полиметилметакрилат ЭД-5	1.2	2250	1340	0.32	$3.4 \cdot 10^4$	$5.4 \cdot 10^4$	—
	1.23	2290	1250	0.4	$3.5 \cdot 10^4$	$5.4 \cdot 10^4$	14

2. Методика обработки картины изохром. Важным в применении метода фотоупругости к исследованию динамики и статики трещин является вопрос расшифровки картины изохром вблизи носика трещины. Наиболее точная методика такой расшифровки приведена в работе [2]. В этой работе принимается, что поле напряжений вблизи носика трещины представляется в виде

$$\sigma_{ik} = \frac{N}{\pi \sqrt{r}} f_{ik}(v, C_p, C_s, \vartheta, r) + F_{ik}(v, C_p, C_s, \vartheta, r), f_{22} = 1 \text{ при } \vartheta = 0,$$

где $i, k = 1, 2$ (ось 2 перпендикулярна линии трещины); v — скорость трещины; r, ϑ — координаты полярной системы координат с центром в носике трещины; N — коэффициенты особенности поля напряжений, f_{ik}, F_{ik} — функции, не имеющие особенности по r при $r \rightarrow 0$.

Вид функций $f_{ik}(r, \vartheta), F_{ik}(r, \vartheta)$ принимается таким же, какой они имеют в статике. При этом используется общее представление напряженного состояния вблизи кончика разреза в виде рядов по r [8]. Исследования авторов работы [2] показали, что вполне удовлетворительная точность определения коэффициента особенности поля напряжений N получается при использовании только нулевых членов в разложении f_{ik}, F_{ik} по r . В этом случае для максимального касательного напряжения τ получается следующее выражение:

$$\tau^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{N^2}{\pi^2 r} \sin^2 \vartheta + \frac{2N\sigma}{\pi \sqrt{r}} \sin \vartheta \sin \frac{3}{2} \vartheta + \sigma^2 \right)$$

Параметры N и σ надо выбрать так, чтобы изохромы, описываемые этим выражением, наилучшим образом совпадали с экспериментальными. Ирвин предложил [1] находить N и σ по координатам наиболее удаленной точки какой-нибудь петли изохромы. Недостатком этого способа является то, что он очень ограничен по отношению к точности определения угловой координаты выбранной точки. В данной работе параметры N и σ определялись по размерам радиусов пары петель в направлении, перпендикулярном линии трещины.

Формула для определения значения N в этом случае имеет следующий вид:

$$N = 2\tau_1 \sqrt{r_1} \delta \pi$$

$$\delta^2 = \frac{1}{1+\alpha} \left\{ \frac{(1-\beta) \sqrt{\alpha}}{1-\sqrt{\alpha}} + 1 - \left[1 + \frac{2(1-\beta) \sqrt{\alpha}}{1-\sqrt{\alpha}} - \frac{1-\beta}{(1-\sqrt{\alpha})^2} \right]^{1/2} \right\}$$

$$\alpha = r_1 / r_2, \quad \beta = \tau_2^2 / \tau_1^2$$

Здесь τ_1, τ_2 — значения напряжений для выбранных изохром, r_1, r_2 — вертикальные радиусы этих изохром.

Если разность $\beta - \alpha$ мала, приведенное выражение для δ приближенно представляется в виде

$$\delta^2 = 1 - q + \alpha^{-1/2} q^2 / 2, \quad q = (\beta - \alpha) \alpha^{-1/2} (1 - \alpha^{1/2})^{-1}$$

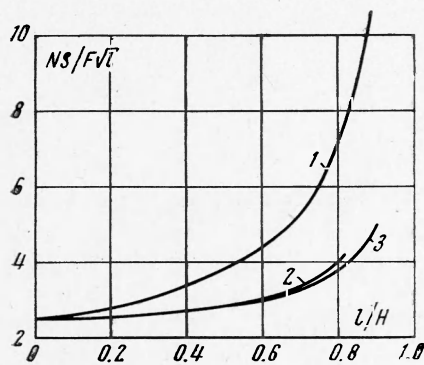
При обработке экспериментальных изохром в данной работе обычно выбиралась изохрома с наименьшими размерами и несколько соседних. Полученные для выбранных пар значения коэффициента N усреднялись. Отклонения от среднего обычно не превышали 10%.

3. Статические испытания. Для исследуемых материалов была проведена серия экспериментов с целью определения критического значения K -коэффициента особенности поля напряжений, достижение которого при статическом нагружении вызывало развитие трещины.

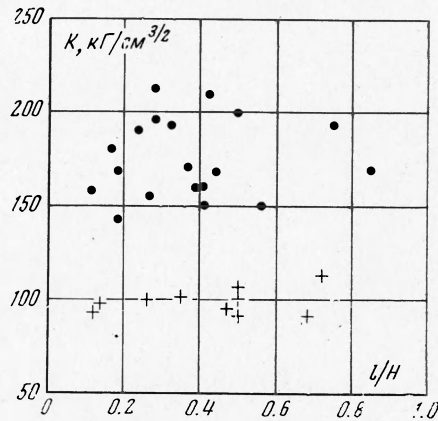
Прямоугольные образцы, надколотые с одной стороны (фиг. 2, б), растягивались в разрывном устройстве. В опытах фиксировалось натяжение, при котором происходил разрыв образца. Критическое значение K -коэффициента особенности поля напряжений для образцов из эпоксидной смолы определялось по картине изохром, зафиксированной с помощью кино съемки в момент перед разрывом. Для образцов из полиметилметакрилата значение коэффициента K определялось по величине критического натяжения и зависимости приведенного коэффициента особенности $Ns / F \sqrt{l}$ от приведенной длины трещины l / H для заданной геометрии образца и условий нагружения (фиг. 3, кривая 1). Здесь F — сила натяжения, l —

длина трещины, s — площадь поперечного сечения пластины, H — ширина образца. Указанная зависимость определялась экспериментально на образцах из эпоксидной смолы. При этом трещина моделировалась тонким пропилом. Картина изохром фотографировалась для каждого значения длины трещины при различной нагрузке. Найденные приведенные значения коэффициента особенности усреднялись.

На фиг. 4 нанесены значения критического коэффициента K особенности поля напряжений, зафиксированные в опытах по растяжению образцов с трещиной из полиметилметакрилата (точки) и эпоксидной смолы (крестики).



Фиг. 3



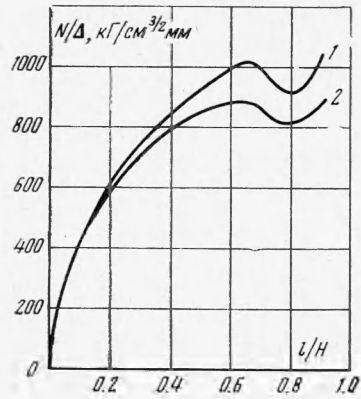
Фиг. 4

Значительный разброс значений критического коэффициента особенности для полиметилметакрилата можно объяснить тем, что выбранная методика определения критического коэффициента весьма чувствительна к несовершенствам предварительно введенной трещины. Было замечено, что любое отклонение начальной трещины от плоскости, перпендикулярной поверхности образца и его боковой кромке, приводит к увеличению критического коэффициента. На основании этого за наиболее вероятные значения критического коэффициента особенности для полиметилметакрилата принимаем $K = 150 \text{ кг/см}^{3/2}$, для эпоксидной смолы $K = 100 \text{ кг/см}$. Постоянство критического коэффициента K при изменении длины начальной трещины в образце свидетельствует о том, что изучаемые материалы удовлетворяют гипотезам теории хрупкого разрушения Гриффитса.

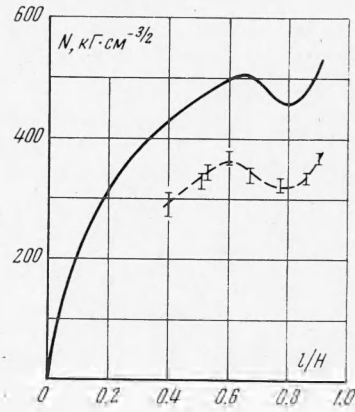
Кривая 2 на фиг. 3 соответствует зависимости $Ns / F \sqrt{l}$ от l / H для образца с двумя внешними симметрично расположенными трещинами (фиг. 2, а, где H — полуширина образца). Такая геометрия образца и используемый в опытах способ напряжения приблизительно соответствуют постановке задачи Бови [7] о растяжении прямоугольного образца с двумя симметрично расположенными боковыми надрезами. Нагрузка в задаче Бови создается постоянным растягивающим нормальным напряжением, приложенным к противоположным краям образца. Решения Бови этой задачи (кривая 3, на фиг. 3) хорошо согласуются с экспериментально найденной зависимостью.

Эксперименты с движущейся трещиной проводились при фиксированном удлинении образца. Интересно сравнить возникающие при этом динамические напряжения со статическими, имеющими место при таком же удлинении образца с неподвижным разрезом соответствующей длины. Что-

бы произвести такое сравнение для коэффициентов особенности N поля напряжений, была построена по статическим экспериментам зависимость

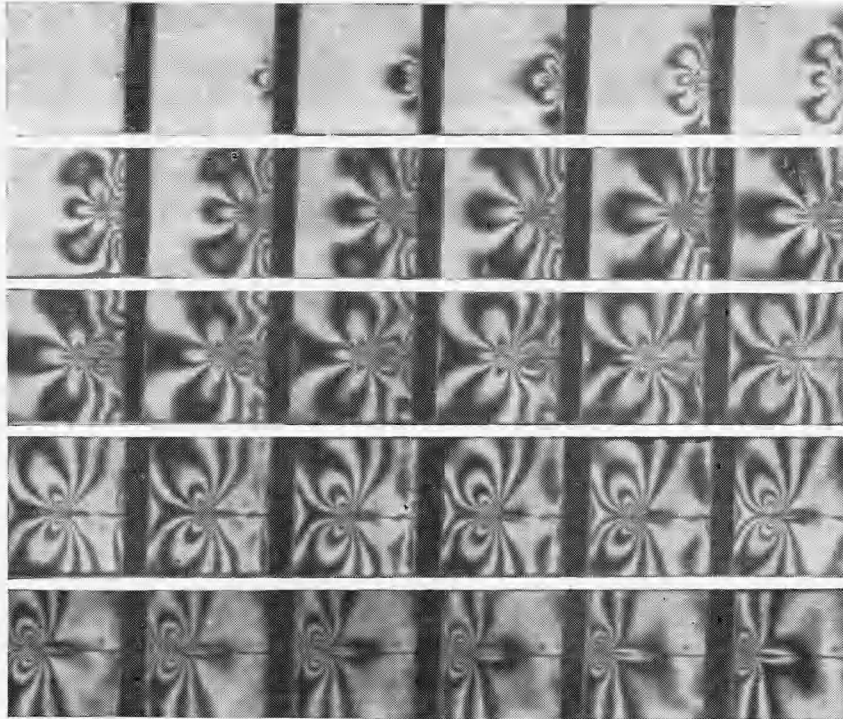


Фиг. 5



Фиг. 6

N / Δ от l / H (Δ — удлинение образца). Эта зависимость представлена на фиг. 5, причем кривая 1 соответствует схеме с одной боковой трещиной (фиг. 2, б), кривая 2 — с двумя боковыми трещинами (фиг. 2, а).



Фиг. 7

4. Динамическое испытание. С помощью камеры СФР производилась киносъемка движущейся через предварительно растянутый образец трещины и возникающей при этом в образцах из эпоксидной смолы картины

изохром. Эксперименты проводились с одной (фиг. 2, б) и двумя (фиг. 2, в) боковыми трещинами, при этом варьировалась величина предварительного удлинения образцов.

Кинокадры поля изохром рассчитывались по приведенной выше методике определения коэффициента особенности поля напряжений. На фиг. 6 приведена зависимость коэффициента особенности поля напряжений от длины трещины для движущейся трещины (кривая 1) и соответствующая статическая зависимость (кривая 2). Предварительное удлинение всего образца из эпоксидной смолы в этом случае составляло 0.5 мм.

Этому же случаю соответствует кинограмма полей изохром, представленная на фиг. 7 (динамика). На фиг. 8 приведена для сравнения фотограмма, полученная в статических испытаниях при $\Delta = 0.3$ мм. На фиг. 9 приведены динамическая (кривая 1) и статическая (кривая 2) зависимости коэффициента особенности поля напряжений от длины трещины, полученные в опытах, проводимых по схеме фиг. 2, в с двумя боковыми трещинами в образцах из эпоксидной смолы.

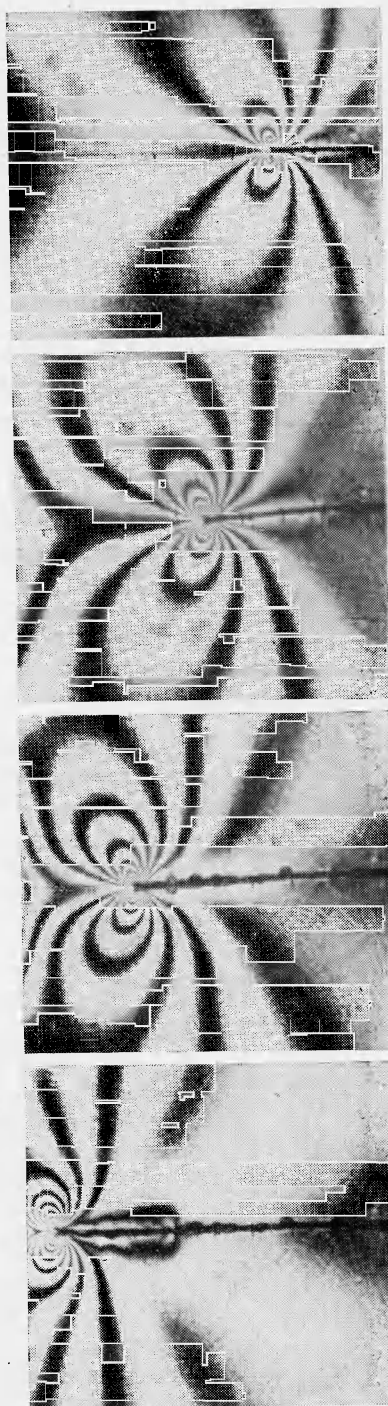
Отсутствие экспериментальных точек на фиг. 6 и 9 при малых значениях l/H объясняется тем, что запуск трещины в образец при динамических экспериментах производился с помощью удара ножа по кромке образца, и поэтому в начальный период развития трещины сильное влияние на картину изохром оказывало воздействие порождающего трещину ножа.

Из графиков, приведенных на фиг. 6 и 9, видно, что при $l/H > 0.3$ динамический коэффициент особенности поля напряжения мало зависит от длины трещины и значение его на 30% меньше среднего на этом интервале статического.

В работе [8] для полубесконечной трещины, движущейся в предварительно напряженном упругом теле, показано, что отношение динамического коэффициента особенности N_d к статическому N_s есть вполне определенная функция скорости трещины v и упругих констант тела

$$N_d = N_s k(v / C_R, \nu)$$

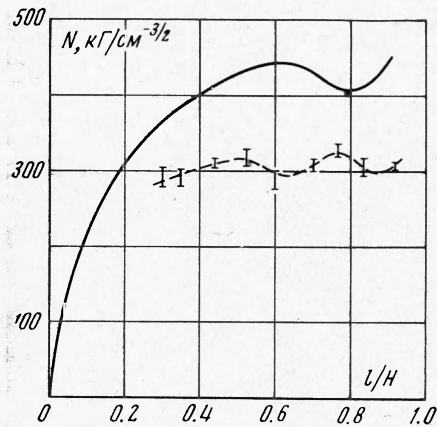
Здесь C_R — скорость рэлеевских волн. Измерения скорости роста трещин в образцах из эпоксидной смолы показали, что в широком диапазоне изменения начального растяжения $v = 400$ м/сек, $v / C_R = 0.4$. По дан-



Фиг. 8

ным работы [8] $k(0.4, 0.3) = 0.7$, что согласуется со значениями зависимости, изображенной на фиг. 6 и 9.

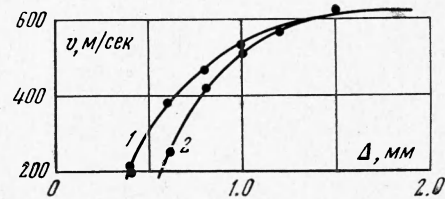
По кинограммам разрушения определялась зависимость длины и скорости трещины от времени. Общим для трещин в образцах из полиметилметакрилата было то, что в начале движения они обычно ускорялись, но потом выходили на режим с постоянной скоростью и вторую половину пути двигались равномерно. На фиг. 10 приведена зависимость величины установившейся скорости трещины от



Фиг. 9

величины предварительного удлинения Δ . Кривая 1 на фиг. 10 соответствует опытам по схеме с одной трещиной, кривая 2 — с двумя трещинами.

В образцах из эпоксидной смолы скорость движения трещин оказалась постоянной и равной 400 м/сек с разбросом, не превышающим 5%.



Фиг. 10

Зависимость скорости трещины от коэффициента особенности для образцов из эпоксидной смолы (кривая 1) и полиметилметакрилата (кривая 2) приведена на фиг. 11. По осям здесь отложены средняя скорость движения трещины и среднее значение N_d . Величина N_d для образцов из эпоксидной смолы определялась прямо по картине изохром. Для образцов из полиметилметакрилата значение N_d определялось по приведенной формуле, при этом значение параметра v/C_R определялось из эксперимента, а значение N_s — из графика фиг. 5. Кружочки на фиг. 11 соответствуют экспериментам с одной трещиной, треугольники — с двумя трещинами.

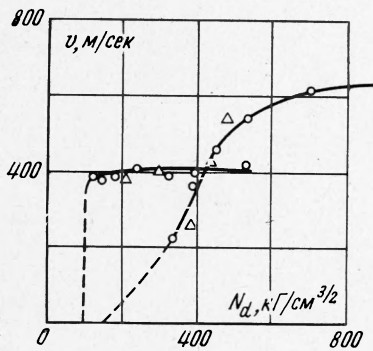
Все точки (фиг. 11) для каждого материала группируются возле своей кривой с разбросом, не превышающим 20%. В то же время можно отметить, что исследуемые материалы один от другого отличаются весьма сильно.

В опытах с движущейся парой трещин обе трещины не всегда доходили до противоположной стороны образца. В некоторых случаях из-за случайно возникающей задержки одна из трещин начинала развиваться позднее, двигалась с меньшей скоростью и останавливалась внутри образца. Была проделана добавочная серия экспериментов с искусственно вводимой задержкой между моментами возникновения трещин. Оказалось, что судьба запоздавшей трещины зависит от того, какую длину l_{10} имела трещина, появившаяся первой, в момент зарождения второй.

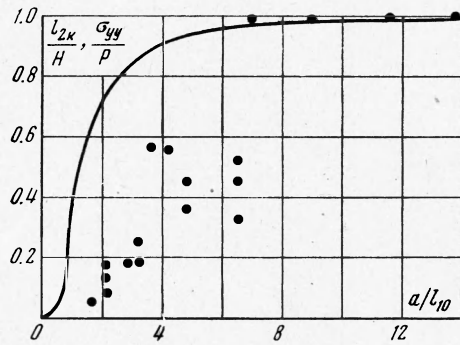
На фиг. 12 представлены точки экспериментальной зависимости окончательной длины l_{2k}/H задержанной трещины от a/l_{10} (a — расстояние между зародышами трещин). Размеры образцов в этой серии 100×180 мм²; $a = 50$ мм, материал — полиметилметакрилат. Из графика фиг. 12 видно, что при $a/l_{10} < 2$ задержанная трещина не развивается. Можно произвести оценку степени влияния трещина на соседние, исполь-

зовав решение статической задачи об изолированной трещине длины $2l_{10}$ в поле однородного растягивающего напряжения P , действующего перпендикулярно линии трещины. Сплошная кривая (фиг. 12) представляет собой зависимость величины σ_{yy} / P напряжения в некоторой точке оси симметрии над такой трещиной от расстояния до этой точки a . Резкое падение кривой при уменьшении a / l_{10} начинается как раз вблизи значения $a / l_{10} = 2$.

При $a / l_{10} \geq 7$ в экспериментах с двумя трещинами скорости трещин выравнивались и обе трещины доходили до противоположного края образца. Было замечено, что при уменьшении величины предварительного натяжения крайняя точка этой зоны смещалась вправо.



Фиг. 11



Фиг. 12

Таким образом, сравнение статических и динамических полей напряжений, возникающих при прохождении трещины через предварительно растянутый образец из эпоксидной смолы, подтвердило вывод [1, 2], что эти поля очень сходны. При этом отношение динамического коэффициента особенности поля напряжений к соответствующему статическому оказалось равным 0.7, что близко к теоретическому значению для полубесконечной трещины, полученному в работе [8].

Для полиметилметакрилата и заполимеризованной эпоксидной смолы найдены зависимости, связывающие динамический коэффициент особенности поля напряжений и скорость трещины. Эти зависимости найдены из опытов, проводимых по двум различным схемам (б и в на фиг. 2), что дает основание предполагать их универсальность для изучаемых материалов.

Исследование процесса разрушения, возникающего при введении в предварительно растянутый образец двух зародышевых трещин показало, что в некотором диапазоне разброса начальных длин зародышевых трещин обе трещины пересекают весь образец. При большем разбросе одна из трещин останавливается внутри образца и, наконец, начиная с некоторой величины разности длин зародышевых трещин, меньшая трещина вообще не развивается.

Поступила 15 V 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Wells A. A., Post D. The dynamic stress distribution surrounding a running crack-A photoelastic analysis. Proc. SESA, 1958, vol. 16, pp. 69—92.
2. Bradley W. B., Kobayashi A. S. Fracture dynamics-A photoelastic investigation. Engng Fract. Mech., 1971, vol. 3, No. 3.

3. Кузнецов В. М. О нестационарном распространении системы трещин в хрупком материале. ПМТФ, 1968, № 2.
 4. Костин И. Х., Славин О. К., Хесин Г. Л., Шпакин В. Н. Методика и аппаратура для исследования динамических задач методом фотоупругости. В сб. «Поляризационно-оптический метод исследования напряжений». Л., Изд. ЛГУ, 1966.
 5. Финкель В. М., Гузь И. С., Куткин И. А., Володарский Ш. Г., Коробов Ю. М. Некоторые результаты исследования взаимодействия волны напряжения с трещиной. В сб. «Высокоскоростная деформация». М., «Наука», 1971.
 6. Willians M. L. On the stress distribution at the base of a stationary crack. J. Appl. Mech., 1957, vol. 24, No. 1.
 7. Бови. Растяжение прямоугольной пластины с симметричными трещинами на кромках. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., Сер. Е, Прикл. механ., 1964, т. 31, № 2.
 8. Freund L. B. Crack propagation in an elastic solid subjected to general loading. II. J. Mech. Phys. Solid., 1972, vol. 20, No. 3.
-