

**О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ ВЫРЕЗОМ
ПРИ РЕШЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ****И. С. Гузь***(Новокузнецк)*

В работе методом динамической фотоупругости исследуется формирование напряженного состояния в вершинах трещины и выреза при воздействии волн напряжений. При этом рассматриваются краевые и замкнутые трещины в случае воздействия продольных и поверхностных волн.

Проведенные исследования показывают, что трещину можно моделировать вырезом лишь при определенных условиях.

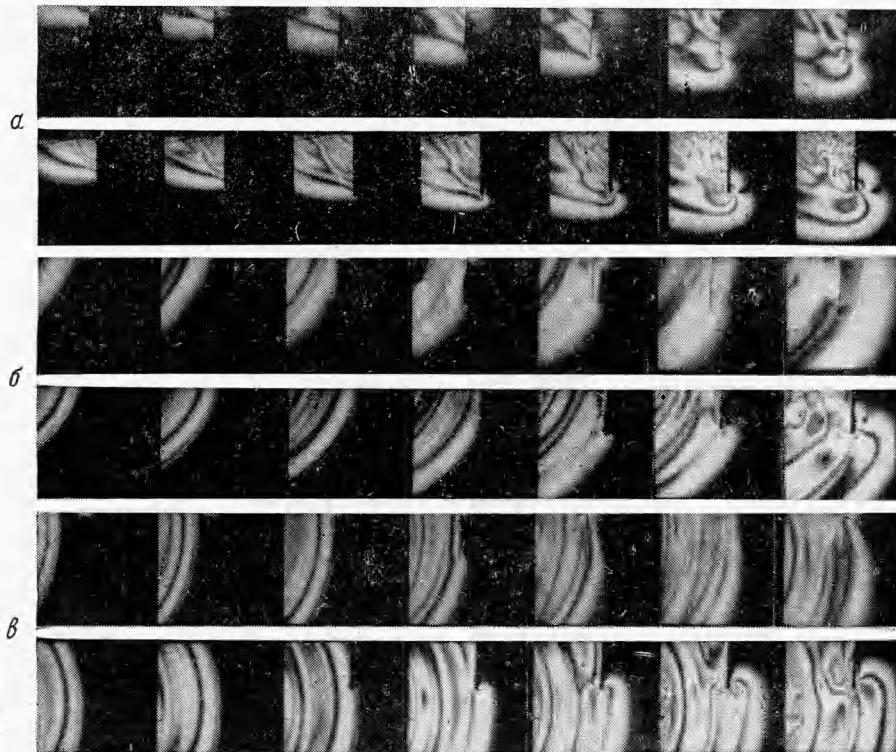
В работе предпринята попытка экспериментально показать правомочность моделирования замкнутых трещин вырезом. Исследования проводились методом динамической фотоупругости на однородном изотропном материале — полиметилметакрилате. На основании проведенных исследований показано, что для изучения физических явлений и формирования напряженного состояния в вершине трещины при динамическом нагружении можно пользоваться вырезом лишь при определенных условиях.

Взаимодействие продольных и поверхностных волн с трещиной и вырезом рассматривалось при различной ориентации их относительно фронта падающей волны. Изучение взаимодействия продольных волн производилось на образцах в виде дисков диаметром 200 мм и толщиной 15 мм. Поверхностные волны исследовались на образцах с размерами $400 \times 300 \times 15$ мм³. В первом случае вырезы пропиливались по радиусу диска до центра, а трещины зарождались легким ударом ножа в вершинах аналогичных пропилов, но не доведенных до центра образца на 20—30 мм. При этом отбирались образцы с плоским фронтом трещины, находящейся в его центре. Замкнутые трещины моделировались вырезом в центре образца. При нагружении таких образцов волной напряжений по нормали к плоскости выреза происходит симметричное развитие трещин в его вершине. Образующиеся трещины лежат в плоскости выреза и являются как бы его продолжением. Образцы с такими реальными замкнутыми трещинами подвергались дополнительным исследованиям. Возбуждение волн напряжений осуществлялось с помощью микровзрыва 20 мг тэна на торец образца. Полагая, что все условия эксперимента одинаковы, подобие оценывалось по величине и характеру распределения максимальных касательных напряжений в исследуемых зонах.

На фиг. 1, а представлены кинограммы взаимодействия волны напряжений с краевыми вырезом и трещиной. Рассматривается случай распространения волны вдоль одного из берегов трещины. На приведенных кинограммах кадры, соответствующие одинаковым моментам времени (отсчет ведется с момента выхода волны на вершину), наглядно свидетельствуют о совпадении распределения напряжений в их вершинах. Это наблюдается не только в распределении касательных напряжений, но и в их величине. Динамический коэффициент концентрации ориентировочно

равен трем. Это значит, что в рассмотренном случае такое моделирование корректно. Особенностью регистрируемого поля напряжений является направление градиента касательных напряжений под углом $80-85^\circ$ к направлению трещины.

Сопоставляя поля напряжений, полученные при различной ориентации трещин и выреза относительно фронта падающей волны (фиг. 1, б, в), установлено, что изменение угла падения волны вызывает изменение



Фиг. 1

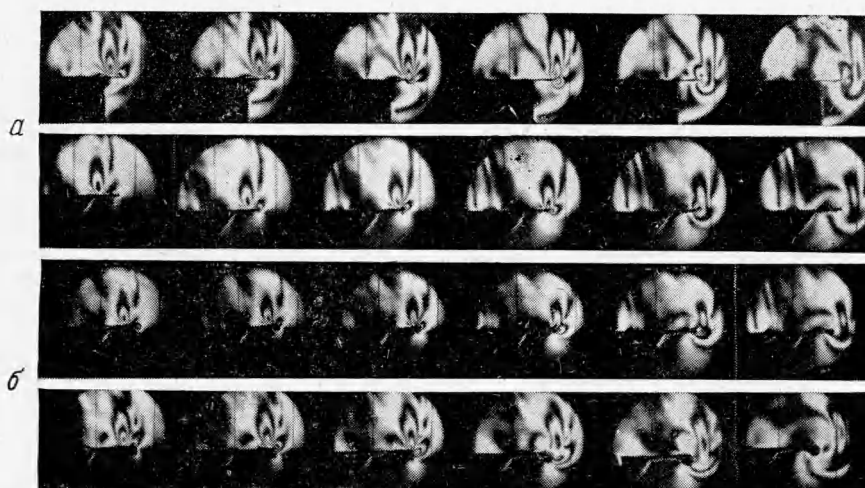
поля напряжений как по величине, так и по характеру распределения касательных напряжений. Изменение положения трещины и выреза в интервале $0-80^\circ$ приводит к изменению поля напряжений лишь по величине. Падение волны по нормали к плоскости трещины вызывает перераспределение напряженного состояния так, что градиент скальвающих напряжений совпадает с направлением трещины. Это указывает на изменение механизма формирования напряженного состояния [1,2].

В этом случае наблюдается нарушение условия моделирования. В результате наличия акустического контакта между берегами трещины распространяющаяся волна напряжений легко трансформируется через нее, слабо реагируя на нарушение сплошности. В результате в вершине трещины создается слабое дифракционное поле напряжений, которое в первом приближении совпадает с полем в вершине выреза. Расклинивание трещины уменьшает это несоответствие, но не устраняет его полностью, поскольку не удастся устранить акустический контакт в устье трещины в результате ее продвижения. Дальнейшее увеличение угла падения волны дает вновь совпадение результатов. Зависимость коэффициентов кон-

центрации от угла падения волны представлена ниже.

β°	0	30	60	90	120	150
K_d для трещины	3.1	2.7	2	1.1	1.9	2.5
K_d для выреза	3	2.5	1.8	1.5	1.7	2.4

Здесь $K_d = K_{\max}/K'_{\max} K_{\max}$, — максимальная концентрация упругой энергии в устье трещины в результате воздействия волны, K_{\max} — максимальная концентрация энергии во фронте падающей волны до взаимодействия с трещиной.



Фиг. 2

Эти величины определялись в одинаковом объеме по методике, изложенной в работе [1]. В этом случае затуханием волны можно пренебречь, так как расстояние между зонами, в которых определялась величина упругой энергии, незначительно.

Таким образом, несоответствие наблюдается лишь при ориентации трещины по нормали к направлению распространения волны. При количественных измерениях на модели в этом случае возникает погрешность — полученные результаты оказываются несколько завышенными.

Представляют интерес исследования взаимодействия рэлеевских волн с трещиной и вырезом. Они, как и объемные, возбуждались сосредоточенным микровзрывом, который производился на расстоянии 200 мм от вершины трещины. Это расстояние выбиралось из условия, чтобы к моменту выхода рэлеевской волны на вершину трещины произошло полное разделение ее с поперечной.

Кинограммы взаимодействия рэлеевской волны с трещиной и вырезом показаны на фиг. 2, а. Обработка этих результатов (определение изменения величины упругой энергии в вершине, коэффициентов прохождения и отражения рэлеевской волны) показывает, что в случае выреза с радиусом вершины менее 0.5 мм существует практически полная аналогия происходящих процессов и напряженного состояния с трещиной. При радиусах больше этого значения наблюдается некоторое несоответствие. Для оценки влияния радиуса вершины на прохождение поверхностных

волн проводились дополнительные исследования (фиг. 2, б). Обработка результатов показала, что коэффициент прохождения рэлеевской волны K_R зависит от радиуса лишь при увеличении его до 1 мм. Дальнейшее возрастание не приводит к существенному изменению K_R . Его значение определялось следующим образом:

$$K_R = K_R' / K_{\max}$$

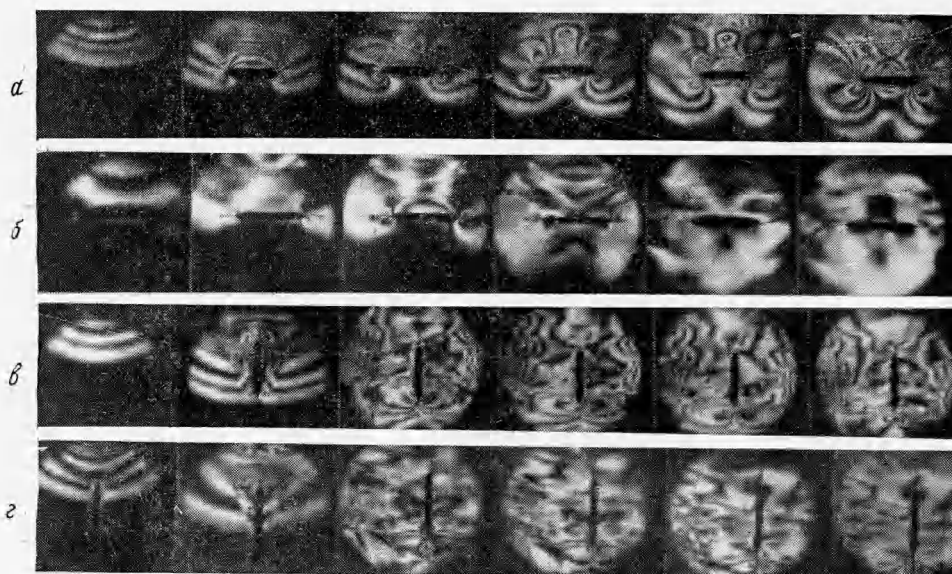
где K_R' — величина упругой энергии, прошедшей через вершину в теневую зону, определяемая аналогично K_{\max} .

Зависимость коэффициента прохождения рэлеевской волны от радиуса вершины представлена ниже.

$r, \text{мм}$	трещина	0.25	0.5	1	2	3	4
K_R	0.08	0.23	0.4	0.41	0.42	0.42	0.43

Сопоставление изменения K_R во времени с формой нагрузки показывает, что при радиусах вершины более 1 мм они идентичны, т. е. существует линейная зависимость между передачей энергии в теневую область и формой нагрузки.

Исследовалось также взаимодействие волн напряжений с замкнутыми трещинами. Рассматривался вырез, имитирующий трещину, и вырез с реальными трещинами в его вершинах при различных углах падения волны (фиг. 3). Результаты свидетельствуют о том, что, как и в случае краевой трещины, изменение угла падения волны влечет за собой перераспределение напряженного состояния в вершинах выреза и трещины. При падении волны по нормали к вырезу (фиг. 3, а) вначале возникает равномерное поле напряжений вдоль верхней плоскости выреза, обусловленное интерференцией падающей и отраженной волн, и, аналогичное возникшему при отражении волны от свободной поверхности.



Фиг. 3

На некотором расстоянии от плоскости выреза образуется область максимальной концентрации напряжений, которые могут привести к откольным явлениям. Величина максимальных касательных напряжений составляет 400—500 кг/см². В результате дифракции на вершинах создаются симметричные розетки напряжений, градиент которых направлен вдоль выреза. Затем происходит усиление интерференционной картины у верхней плоскости выреза и дифракция волны в теневую область, где возникает концентрация напряжений вследствие сложения волн, пришедших справа и слева. Сток энергии в теневую зону, по-видимому, происходит как за счет продольных, так и за счет поверхностных волн. При достижении концентрации напряжений, превышающей динамический предел прочности, происходит развитие трещины в направлении градиента касательных напряжений.

Замечено, что при воздействии волны происходит прогиб верхней плоскости трещины. В определенных условиях стрела прогиба составляет величину, достаточную для образования и развития трещины в средней части выреза. Развитие ее происходит со скоростью 30—40 м/сек навстречу падающей волне. Малая скорость роста трещины, вероятно, объясняется тем, что развитие ее идет в сжимающем поле падающей волны, которое частично компенсирует растягивающие напряжения в вершине трещины. Увеличение интенсивности падающей волны не приводит к возрастанию скорости роста этой трещины.

При совпадении направления выреза и распространения волны (фиг. 3, в) вначале формируется розетка напряжений в близлежащей вершине надреза, а затем она несколько видоизменяется и трансформируется в поверхностные волны, распространяющиеся по плоскостям выреза. Приход этих возмущений к противоположной вершине создает напряженное состояние в ее окрестности, способное вызвать развитие трещины. Характерно, что в рассмотренных случаях процесс формирования динамического поля напряжений в вершинах выреза отличается по физической сущности: в первом случае концентрация напряжений обусловлена дифракцией продольной волны, а во втором — она связана с распространением поверхностных волн. Несмотря на это, направление градиента скалывающих напряжений в этих случаях совпадает. Как следствие этого совпадают траектории движения трещин.

При падении волны под углом 30—60° распределение напряжений отличается от рассмотренных первых двух случаев. Разница состоит в изменении градиента касательных напряжений и в поочередном их усилении или релаксации в вершинах. Эти пульсации связаны с возбуждением поверхностных волн по берегам выреза. Вследствие напряженного состояния образца не удается наблюдать распространение этих возмущений, но проведенные исследования по изучению рэлеевских волн¹ показывают, что характер распределения напряжений в вершинах соответствует воздействию этого типа волн.

Далее рассматривалось взаимодействие волн с вырезом, имеющим реальные трещины в своих вершинах (фиг. 3, б, г). Полученные кинокадры указывают на наличие некоторых особенностей в формировании напряжений: в случае падения волны по нормали к плоскости трещины не создается такой концентрации, как на вырезе. Наблюдаемые явления аналогичны рассмотренным при изучении взаимодействия волны с краевой трещиной. Волна легко трансформируется через нарушение сплошности, если расстояние между ее берегами соизмеримо с величиной упругой де-

¹ Гузь И. С. Экспериментальные исследования взаимодействия волн напряжений с трещиной. Канд. дисс., Сибирск. металл. ин-т, Новокузнецк, 1971.

