

Полученные экспериментально значения Φ по характеру зависимости от α совпадают с расчетными, несколько превышая их по величине. Для иллюстрации на фиг. 2 приведены экспериментальные значения Φ (средние значения по пяти опытам и их разброс), полученные на стандартном пенопласте ПС1-350.

Поступила 29 VI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
2. Фонарев А. С. Нестационарное расширение газа в вакуум при различных законах и длительности выделения энергии. Инж. ж., 1965, т. 5, вып. 1.
3. Калмыков А. А., Кондратьев В. Н., Немчинов И. В. О разлете мгновенно нагретого вещества и об определении его уравнения состояния по величине давления и импульса. ПМТФ, 1966, № 5.
4. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1962.

УДК 539.3.534.231.1

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ С РАСТУЩЕЙ ТРЕЩИНОЙ

И. С. Гузь

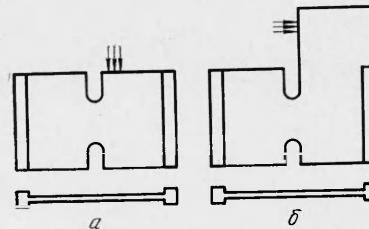
(Харьков)

В работе экспериментально исследуется взаимодействие продольных и рэлеевских волн с растущей трещиной. Показано, что с помощью волн напряжений можно эффективно изменять направление движения растущей трещины и осуществлять ее торможение. Изменение траектории роста трещины обусловлено изменениями напряженного состояния в ее вершине. Угол отклонения трещины зависит от угла атаки волны и исходного напряженного состояния в вершине. Приводится выражение для определения угла отклонения трещины.

Задача о дифракции волны напряжений на прямолинейном разрезе, подобном трещине, решалась многими авторами. В [1,2] рассматривалось взаимодействие плоской упругой волны с разрезом, края которого свободны или закреплены. Другое решение этой задачи приведено в [3], где искомые смещения выражены через значения некоторой функции $F_1(\theta)$, которая легко табулируется.

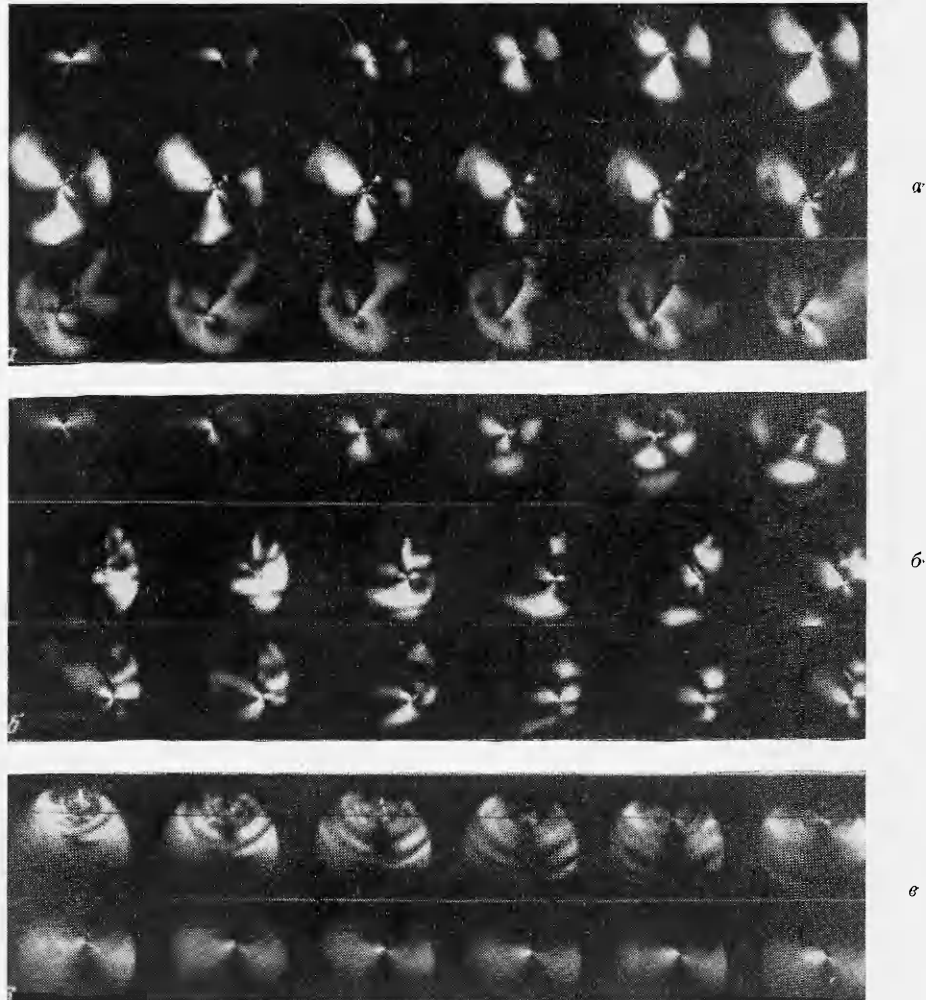
Авторы [4] исследовали воздействие поперечной волны на стационарную трещину. Экспериментально дифракция рэлеевских волн на трещине изучалась в [5,6]. Показано, что продольные и поверхностные волны могут стимулировать развитие трещины, траектория их роста определяется напряженным состоянием, возникающим в окрестности вершины. Факт изменения траектории движения при воздействии упругих волн известен давно [7,8]. Это успешно применялось для определения скорости развития трещины, но собственно управление траекторией не рассматривалось, хотя в [8] приводится аналитическое выражение для определения угла отклонения при ударном сжатии и растяжении. Ниже будет показано, что приведенное выражение экспериментально не подтверждается.

Исходя из предположения, что доминирующим фактором, определяющим траекторию и скорость роста трещины, является напряженное состояние в ее вершине и что с помощью волн напряжений можно эффективно его изменять, были проведены исследования по определению возможности управления траекторией движения трещины с помощью волн напряжений. Использовался поляризационно-оптический метод в сочетании со скоростной киносъемкой.



Фиг. 1

Эксперименты проводились на образцах из плексигласа в виде пластин с размерами $350 \times 250 \times 10$ мм³. Они изготавливались двух типов: одни для изучения взаимодействия трещины с продольными волнами (фиг. 1, а), другие — с рэлеевскими (на фиг. 1, б стрелкой показано место приложения динамической нагрузки). Различия в форме образцов обусловлены особенностью возбуждения и распространения



Фиг. 2

рэлеевских волн. Для задания трещине определенной траектории движения в середине образцов делались надрезы на глубину 50 мм, а для сообщения ей максимальной скорости образцы растягивались с помощью специального приспособления. Старт трещины инициировался взрывом микрочаряда, установленного в надрезе. При распространении трещины на глубину 30—50 мм, когда она входила в исследуемую область, на ее берегах возбуждались продольные или рэлеевские волны. Продольные волны возбуждались по методике, описанной в работе [5], и посылались вдоль трещины по одному из ее берегов.

Генерирование рэлеевских волн производилось путем сосредоточенного взрыва на продолжении одного из берегов трещины [6]. Расстояние от места взрыва до вершины растущей трещины 150—170 мм. Киносъемка осуществлялась со скоростью 480 000 кадр./сек. Необходимо было синхронизировать момент выхода трещины в исследуемую зону с работой импульсного источника света, выходом волны на вершину трещины и началом съемки. Так как скорость трещины от эксперимента к эксперименту не

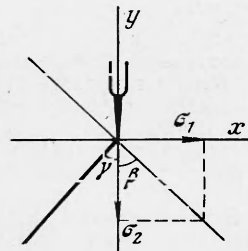
является постоянной, то это оказалось одной из сложнейших задач данного исследования. Это было преодолено следующим образом: образцы изготавливались с одинаковыми параметрами надрезов и нагружались до одинаковой величины концентрации напряжений у надреза. Импульсный источник света включался одновременно со стартом трещины, а возбуждение волн напряжений производилось спустя 100 мксек. Момент съемки подбирался экспериментально.

Кинограммы взаимодействия продольных и рэлеевских импульсов с растущей трещиной приведены соответственно на фиг. 2, а, б, а распределение напряжений в ее вершине при отсутствии воздействия волн напряжений — на фиг. 2, в. Анализ кинограмм показывает, что в начальный момент разрыва сплошности скорости трещины скачкообразно изменяется от 0 до 300—400 м/сек в течение 1—2 мксек, т. е. ускорение трещины $2 \cdot 10^8$ м/сек². Затем скорость разрушения стабилизируется и составляет 350—370 м/сек. Траектория движения трещины прямолинейна и лежит в плоскости наиболее опасного сечения. При отсутствии воздействия волн напряжений на растущую трещину в ее вершине формируется симметричное поле напряжений.

Исследования зоны микровзрыва показывают, что нагружаемая область расчленяется несколькими радиальными микротрещинами, отстоящими достаточно далеко одна от другой. Магистральной оказывается та из них, которая направлена в сторону наиболее опасного сечения. Старт трещины под действием взрыва происходит практически без задержки (время задержки 2—3 мксек). Столь малое время вряд ли можно связать с пластической деформацией, оно, скорее, обусловлено формированием напряженного состояния. Рост трещины при удалении от зоны взрыва происходит под действием упругой энергии, запасенной в образце и нагружающем устройстве.

В случае воздействия на фронт развивающейся трещины продольных волн (фиг. 2, а) в ее вершине происходит перераспределение напряженного состояния, в результате этого градиент максимальных касательных напряжений поворачивается на некоторый угол γ относительно первоначального направления. Поскольку скорость упругих волн значительно больше скорости роста трещины, процесс взаимодействия волн с растущей трещиной можно рассматривать так же, как со стационарной. Тогда согласно [5] при воздействии волны в вершине трещины возникают динамические растягивающие напряжения, направленные по нормали к статическим, в результате происходит наблюдаемое на кинограммах перераспределение напряженного состояния. Обозначив через σ_1 главные нормальные напряжения, вызванные статическим нагружением, а через σ_2 — соответственно динамическим, и считая, что рост трещины происходит под действием нормальных растягивающих напряжений, под углом 90° к направлению их действия, угол отклонения трещины можно выразить как $\gamma = 90^\circ - \beta$, где β — угол между первоначальным направлением роста трещины и направлением равнодействующей нормальных напряжений (фиг. 3).

В [5] показано, что при изменении угла ввода волны α характер распределения напряжений (для малых α) не изменяется, а изменяется лишь их величина. Это означает, что ответственной за формирование напряжений является деформация, направленная вдоль трещины. При возрастании α ее величина уменьшается по закону косинуса. Учитывая это, можно записать



Фиг. 3

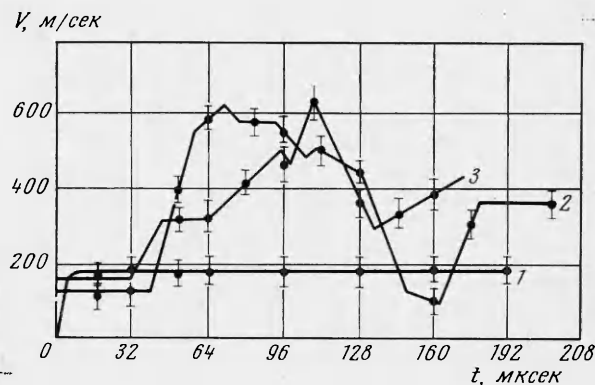
$$\gamma = 90^\circ - \arctg \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 90^\circ - \arctg \left(\frac{2\tau_{\max}}{\sigma_2} + 1 \right)$$

при α и σ_1 , равных нулю, $\gamma \rightarrow 90^\circ$, т. е. величина γ зависит от угла ввода волны и величины статических растягивающих напряжений. Это хорошо подтверждается экспериментально. Выражение для γ , приведенное в работе [8], экспериментально не подтверждается (для рассмотренного выше случая оно дает значение $\gamma = 0$).

Результаты кинематографических исследований позволяют определить время, необходимое для формирования поля напряжений в окрестности вершины трещины при воздействии на нее волны напряжений. Оно определяется скоростью распространения упругих волн и в исследуемом материале составляет 1—2 мксек. Характерно, что перераспределение напряженного состояния происходит даже при очень малых амплитудах волны напряжений. Это объясняется участием в процессе перераспределения небольшого объема материала в вершине трещины. Особенностью рассматриваемого разрушения является высокая скорость роста трещины (700—800 м/сек) и большие ее ускорения. Фиг. 4 иллюстрирует изменение скорости роста трещины во времени: 1 — при отсутствии воздействия; 2 — воздействие продольной волны; 3 — воздействие рэлеевской волны.

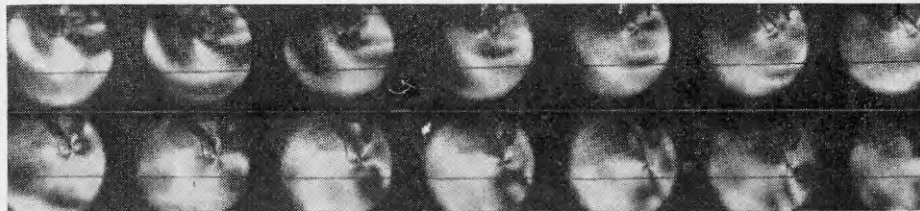
Столь высокий темп роста трещины при воздействии волны объясняется тем, что приток упругой энергии в зону разрушения значительно превышает расход энергии, избыток ее расходуется на разгон трещины. На кинограммах наглядно видно возрастание упругой энергии в вершине трещины при воздействии волны напряжений. Утверждение [7], что изменение напряжений различными упругими волнами не оказывает заметного влияния на рост трещины, является недостаточно обоснованным.

Тщательный анализ кинетики взаимодействия растущей трещины с рэлеевскими волнами показывает, что при выходе их на вершину трещины вначале формируется



Фиг. 4

поле напряжений, аналогичное воздействию продольной волны, распространяющейся по одному из ее берегов. Градиент касательных напряжений изменяется, как в вышеописанном случае, но спустя 4—6 мксек после выхода волны на вершину происходит повторное перераспределение напряженного состояния в ее окрестности. При этом



Фиг. 5

градиент касательных напряжений изменяет свое направление на угол 100—120° относительно первоначального направления. Синхронно происходит изменение траектории роста трещины. Такая закономерность изменения напряжения в вершине трещины при воздействии рэлеевских импульсов обусловлена их неоднородностью. Полученные результаты подтверждают предположения о том, что впереди идущая розетка в рэлеевском импульсе связана с деформацией вдоль полупространства, а основное возмущение — по нормали к нему [6].

При проведении эксперимента было также обнаружено, что под влиянием волн напряжений в процессе роста магистральной трещины иногда образовывалась не одна, а две или несколько трещин. В этих случаях скорость распространения образовавшихся трещин резко уменьшалась, в некоторых случаях наблюдалась их полная остановка (фиг. 5). Регистрируемое торможение трещин можно объяснить как частичным совпадением траектории их движения с направлением приложенных напряжений, так и процессом ветвления.

При повороте трещины под действием волны вдоль направления приложенных статических напряжений при отсутствии ветвления процесса торможения не наблюдается, а наоборот, движение трещины ускоряется. Процесс ветвления приводит к перераспределению энергии между растущими трещинами (фиг. 5), поэтому наблюдается заметное снижение скорости. Имеющиеся в литературе сведения носят противоречивый характер: ряд авторов отмечает, что процесс ветвления не сопровождается изменением скорости роста трещины [7], другая группа исследователей утверждает обратное [9].

Не менее разноречивы мнения и о механизме этого явления: согласно [10] ветвление наступает при скорости роста трещины, равной 0.6—0.7 скорости поперечных волн в данном материале; по мнению авторов [11], это явление имеет место, когда срезающие напряжения перед трещиной и с боков от нее оказываются равными. Ветвление, наблюдавшееся в данной работе, связано со сложной картиной распределения напряжений в вершине трещины в результате воздействия рэлеевских волн, поскольку исходная скорость магистральной трещины была значительно меньше скорости ветвления, т. е. 300—400 м/сек. Оно происходит в момент времени, когда в вершине создается напряженное состояние с двумя ярко выраженными градиентами максимальных касательных напряжений и при воздействии волны достаточной интенсивности. Такое напряженное состояние реализуется во время изменения направления градиента касательных напряжений.

В случае распространения двух трещин параллельно друг другу наблюдаются некоторые особенности процесса разрушения, заключающиеся в появлении шероховатости поверхности излома. Это объясняется воздействием волн напряжений, генерируемых растущими трещинами, поскольку в случае распространения одиночной трещины поверхности разрушения остаются гладкими.

Таким образом, воздействие волн напряжений на вершину растущей трещины можно рассматривать как один из методов управления и торможения в закритической стадии разрушения.

Поступила 1 VIII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридман М. М. Дифракция плоской упругой волны относительно полубесконечного прямолинейного разреза, свободного от напряжений. Докл. АН СССР, 1949, т. 66, № 1, стр. 21—24.
2. Фридман М. М. Дифракция плоской упругой волны относительно полубесконечной, прямолинейной, жестко заделанной щели. Уч. зап. Ленингр. ун-та, Сер. матем. н. Механика, 1949, вып. 17, № 114, стр. 72—94.
3. Филиппов А. Ф. Некоторые задачи дифракции плоских упругих волн. ПММ, 1956, т. 20, вып. 6, стр. 688—703.
4. Яхьяиши. Дифракция и распространение трещины. Прикл. механ., 1967, № 3, стр. 26—30.
5. Володарская Ш. Г., Гузь И. С., Куткин И. А., Финкель В. М. Исследование взаимодействия волны напряжений со стационарной макротрещиной в упруго-пластических и квазихрупких материалах. ПМТФ, 1971, № 3.
6. Гузь И. С., Финкель В. М., Червов Г. А. Некоторые результаты исследования взаимодействия рэлеевских импульсов с краевыми трещинами. ПМТФ, 1972, № 6.
7. Шардин Х. Исследование скорости разрушения. В сб. «Атомный механизм разрушения». М., Металлургиздат, 1963.
8. Керкхоф Ф. Модуляция хрупкой трещины упругими волнами. В сб. «Физика быстропротекающих процессов», т. 2. М., «Мир», 1971.
9. Финкель В. М. Физика разрушения. М., «Металлургия», 1970.
10. Craggs J. W. On the propagation of crack in an elastic-brittle-material. J. Mech. and Phys. Solids, 1960, vol. 8, No. 1.
11. McClintock F. A., Sukhatme S. P. Travelling cracks in elastic materials under longitudinal shear. J. Mech. Phys. Solids, 1960, vol. 8, No. 3, pp. 187—193.

Технический редактор Э. Ф. Бунова

Сдано в набор 2/VIII-1974 г.	Т-13258	Подписано к печати 8/X-1974 г.	Тираж 2015 экз.
Зак. 955	Формат бумаги 70×108 ¹ / ₁₆	Усл. печ. л. 14,7 Бум. 5 ¹ / ₄	Уч.-изд. л. 15,4

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10