

УДК 539.375

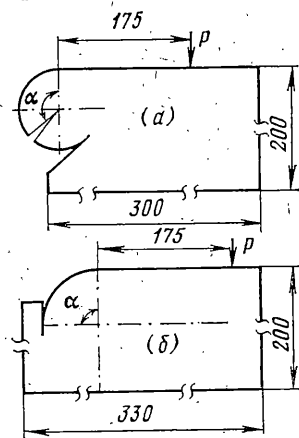
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ С ТРЕЩИНОЙ,  
РАСПОЛОЖЕННОЙ НА КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

ГУЗЬ И. С.

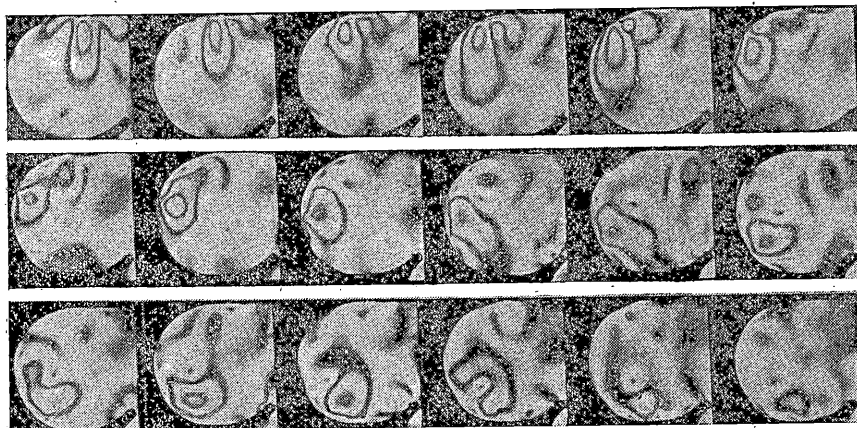
Взаимодействие волн напряжений с трещинами, расположенными на прямолинейной поверхности, изучалось в [1-3]. Исходя из анализа напряжений, возникающих в вершинах, показаны особенности их развития. Учитывая, что в практике трещины чаще встречаются на криволинейной поверхности и кривизна влияет на распределение напряжений в поверхностной волне [4], представляло интерес, рассмотреть взаимодействие поверхностной волны с трещиной, расположенной на выпуклой поверхности.

Эксперименты проводились на плоских образцах из полиметилметакрилата. Их форма и размеры (фиг. 1) выбирались из условия, чтобы к моменту выхода поверхностной волны в исследуемую область происходило полное ее разделение с продольной и поперечной и отсутствовали отраженные волны от границы модели. Импульсы поверхностной волны возбуждались точечным микровзрывом (длительностью 25-30 мкс) на прямолинейном участке образца, сопряженным с криволинейным. Регистрация поверхностной волны производилась в поляризованном свете кинокамерой СФР-1М с частотой съемки 1,5 млн. кадр/с в момент выхода ее на выпуклую поверхность.

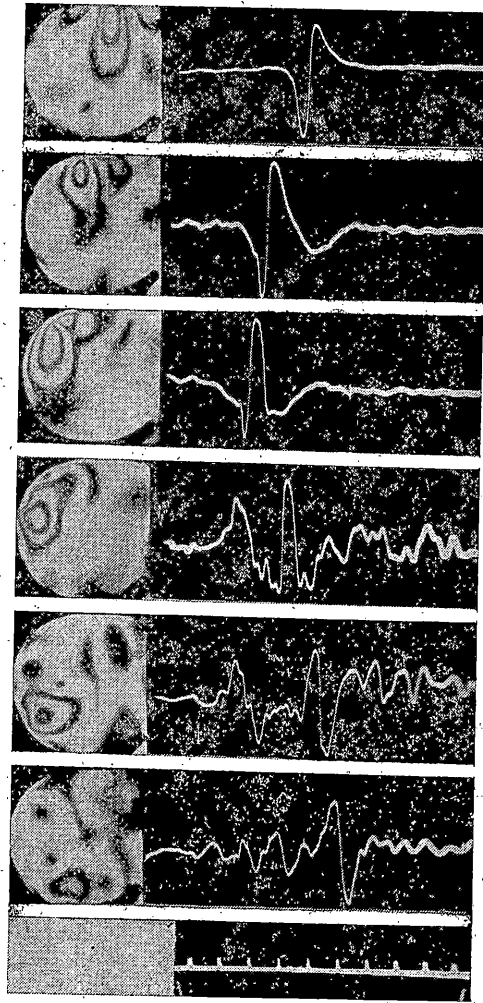
Кадры кинограмм, фиксирующие распространение исследуемой волны, приведены на фиг. 2 (цена полюсы 20 МПа, время между кадрами 3 мкс). Из них следует, что при движении релеевской волны вдоль прямолинейного полупространства возникает напряженное состояние, характерное для этого типа волн: два экстремума на контуре образца  $z=0$  (фаза сжатия и растяжения) и один подповерхностный максимум с двумя изотропными точками, глубина расположения которых определяется расположением источника. Последующее распространение волны на криволинейном участке образца характеризуется перераспределением напряжений. Так, на участке  $\alpha = -0-22,5^\circ$  ( $\alpha$  - центральный угол) в этот процесс вовлекается первая приповерхностная розетка, а затем по мере продвижения волны - основное возмущение и вторая приповерхностная розетка. Уменьшение напряжений в первой приповерхностной розетке связано с возбуждением продольных волн и приводит к полному преобразованию энергии в объемные волны. Это можно проследить по уходящим изохромам и полному исчезновению приповерхностной розетки (фиг. 2). Кроме того, изменение



Фиг. 1



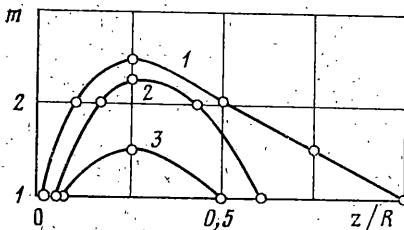
Фиг. 2



Фиг. 3

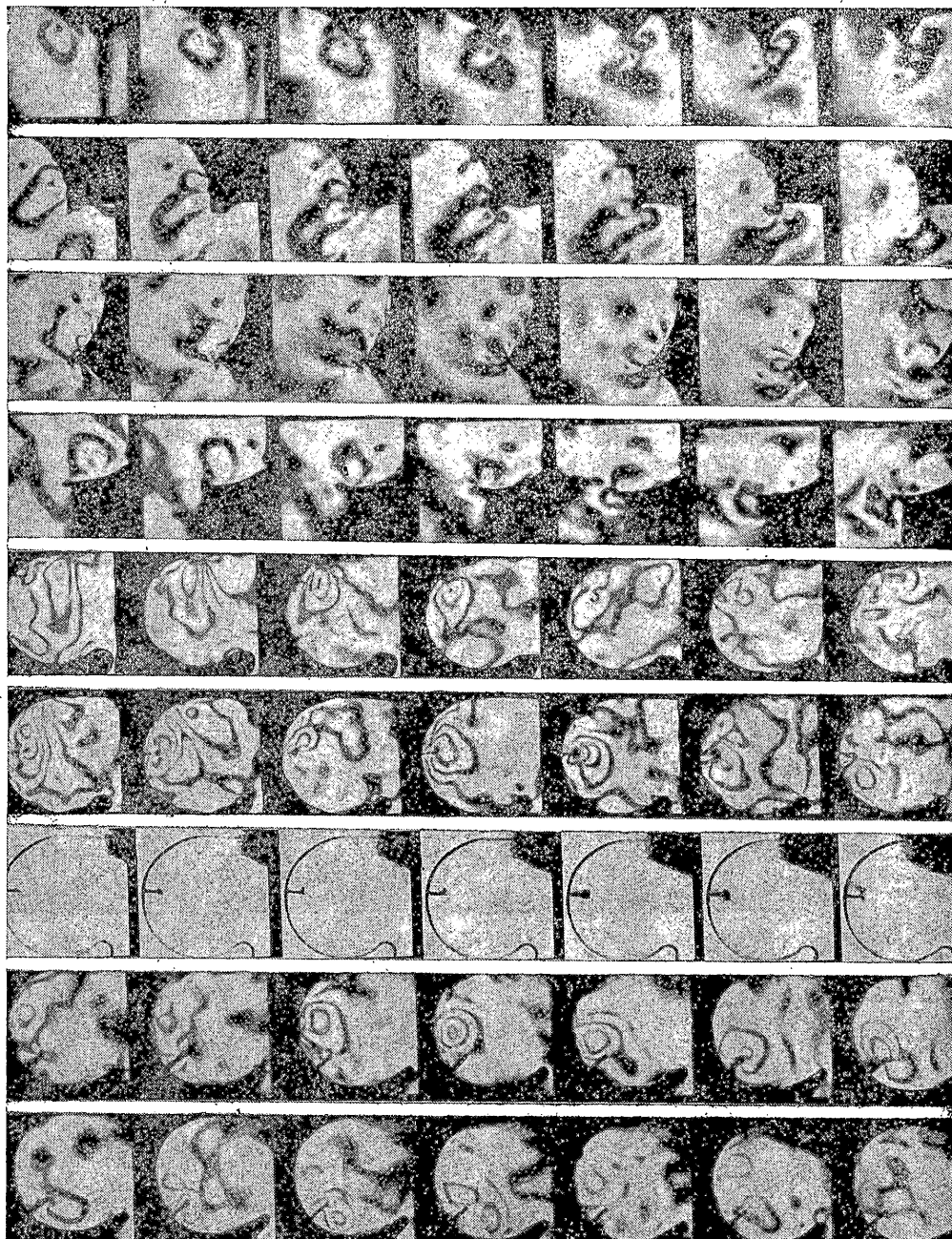
исходной картины максимальных касательных напряжений включает сжатие основного (подповерхностного) возмущения вдоль большей полуоси и расширение вдоль меньшей, т. е. наблюдается своеобразное увеличение длительности импульса.

Важной особенностью является тот факт, что при движении поверхностной волны по криволинейной поверхности изменение глубины волны происходит таким образом, что ее значение оказывается не более радиуса кривизны. При движении на этом участке второй приповерхностной розетки происходит усиление напряжений в самой розетке и в окрестности изотропной точки, разделяющей основное возмущение и приповерхностную розетку (фиг. 2, кадр 5).



Фиг. 4

По мере продвижения волны изотропная точка перемещается к свободной поверхности. Наблюдаемые процессы приводят к изменению и напряжений на контуре модели (фиг. 3), время между метками 25 мкс, осциллограммы а, б, в, г, д соответствуют выходу волны на участок  $\alpha=0, 22,5, 45, 90, 135$  и  $180^\circ$  ( $\alpha$  — центральный угол, отсчитываемый против часовой стрелки от точки сопряжения прямолинейной и криволинейной части образца). Несмотря на отсутствие первой приповерхностной розетки на интерференционной картине, тензометрия контурных напряжений свидетельствует лишь о частичном уменьшении амплитуды и длительности фазы растяжения (фиг. 3, б). Отмечается также усиление амплитуды и увеличение фазы сжатия.



Фиг. 5

На участке  $\alpha=22,5-45^\circ$  амплитуда фазы растяжения продолжает уменьшаться (фиг. 3, *е*), при этом происходит изменение распределения напряжений в основном возмущении с глубиной (фиг. 4) — кривые 1, 2, 3 соответствуют выходу волны на участке  $\alpha=0, 90$  и  $180^\circ$ . При  $\alpha=90^\circ$  на интерференционной картине отчетливо выраженным остается лишь основное возмущение, которое предварительно существенно изменилось, и линии равных значений максимальных касательных напряжений приняли форму, близкую к концентрическим окружностям. Формирование такой розетки напряжений сопровождается интенсивным излучением продольных волн. Наблюдая за изменением напряжений в поверхностной волне, можно утверждать, что при определенных условиях реализуются ситуации, при которых волна своим сложным распределением напряжений в основном возмущении возбуждает новые возмущения на участках свободной поверхности, прежде чем достигнет этой области передний фронт контурных напряжений (см. осциллограммы фиг. 3, *г*, *д*, *е*). В результате при

определении скорости поверхностной волны по осциллограммам могут возникнуть некоторые неточности.

Безьма ценную информацию можно получить сопоставляя результаты, полученные двумя методами. Так, анализируя распределение напряжений в поверхностной волне, видим, что примерно 50% упругой энергии основного возмущения преобразуются в другие типы волн, прежде чем оно проходит область  $\alpha=0-180^\circ$ . В то же время тензометрические измерения указывают на незначительное изменение контурных напряжений. Это свидетельствует о том, что наряду с рассеиванием энергии в волне происходит ее локализация у поверхности.

Поскольку при распространении поверхностной волны вдоль криволинейного полупространства происходят значительные изменения в ее структуре, распределении напряжений и энергии, то следует ожидать, что формирование динамических напряжений в вершине трещины, расположенной на выпуклой поверхности, будет отличаться от рассмотренного в [1-3]. В этой связи рассмотрим, как поверхностные волны, распространяющиеся вдоль выпуклого полупространства, взаимодействуют с трещинами, расположенными вдоль и по нормали к свободной поверхности. Трещины длиной 5, 10 и 15 мм зарождались на участках криволинейной поверхности  $\alpha=45, 90$  и  $135^\circ$ .

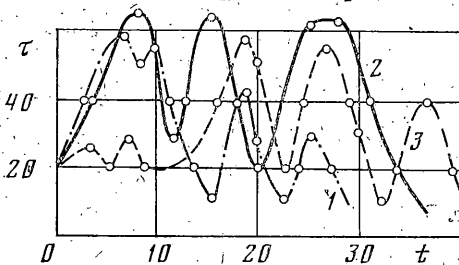
Взаимодействие волны с трещиной, расположенной на участке  $\alpha=45^\circ$ , показано на фиг. 5, а. К моменту выхода на вершину трещины волна претерпевает сложные изменения и картина напряжений не соответствует поверхностным волнам Релея. Взаимодействие исследуемой волны с трещиной вначале сопровождается перераспределением напряжений в самой волне, а затем — дифракцией на вершине трещины. Изменение напряжений в волне происходит таким образом, что их распределение стремится к релеевскому. Дифракция волны формирует в окрестности вершины поле напряжений, градиент которого совпадает с направлением трещины. Это оказывается чрезвычайно опасным с точки зрения развития трещины, так как в этом случае в устье возникают растягивающие напряжения. Перераспределение напряжений в волне и ее дифракция на вершине сопровождаются преобразованием поверхностной волны в объемную.

При расположении трещины на участке  $\alpha=90^\circ$  (фиг. 5, б) — к моменту воздействия на трещину волна разделяется на две части, следующие друг за другом с некоторым временным сдвигом. Воздействие на вершину трещины впереди идущего возмущения создает поле динамических напряжений, соответствующее релеевскому, но затем оно видоизменяется в результате воздействия второго возмущения. Результирующее поле имеет три лепестка напряжений, два из которых примыкают к берегам трещины, а один располагается впереди нее. Такая картина распределения напряжений имеет два направления с примерно одинаковым градиентом максимальных касательных напряжений. Следовательно, при достижении критической величины напряжений развитие трещины может происходить одновременно в двух направлениях, т. е. может иметь место процесс ветвления.

Если трещина расположена на участке  $\alpha=135^\circ$ , то в ее вершине возникают процессы, аналогичные рассмотренным для  $\alpha=90^\circ$ , но менее выраженные, поскольку в эту область волна приходит несколько ослабленной. Кроме того, к моменту выхода на вершину движущееся возмущение разделяется и формируется в две поверхностные волны, имеющие общую изотропную точку (фиг. 5, в).

Взаимодействие волны с трещиной, расположенной на участке  $\alpha=180^\circ$ , в основном сводится к процессу дифракции (фиг. 5, г). Волна легко огибает трещину, создавая слабую концентрацию напряжений в ее вершине. Это обусловлено изменением фазы поверхностной волны при выходе в исследуемую область. В силу малой оптической активности используемого материала не удается наблюдать флуктуаций напряжений в устье трещины, которые несомненно возникают при прохождении возмущений, распространяющихся впереди релеевской волны.

Особый интерес представляет взаимодействие поверхностной волны с трещиной, расположенной по нормали к выпуклой поверхности. Разделение основного возмущения на две части, каждая из которых затем распространяется по берегам трещины, наблюдается при расположении трещины на участке  $\alpha=$



Фиг. 6

$=45^\circ$  (фиг. 1, а). Это сопровождается локализацией энергии основного возмущения в устье трещины и приводит к изменению напряжений в поверхностной волне (фиг. 5, д). Формирующееся в окрестности вершины трещины поле напряжений характерно для сдвиговой деформации. Приповерхностные розетки напряжений в данном случае не оказывают существенного влияния на формирование напряжений в вершине трещины: впереди идущая приповерхностная розетка при выходе на криволинейную поверхность преобразуется в объемные волны, а вторая, слабо дифра-

гируя на двугранном угле, образованном плоскостью трещины и криволинейным полупространством, отражается в виде поверхностной волны. Основное возмущение, достигая криволинейной поверхности и отражаясь, переносит энергию снова к вершине трещины. Это сопровождается перераспределением энергии в ее окрестности и образованием возмущений, распространяющихся в виде поперечных волн, увеличение глубины трещины ( $l=10,15$  мм) приводит лишь к изменению процесса во времени.

Взаимодействие волны с трещиной, лежащей на участке  $\alpha=90^\circ$ , как и в рассмотренном случае, начинается с разделения основного возмущения на две неравномерные части: вдоль нижней плоскости трещины распространяется незначительная часть упругой энергии, величина которой определяется параметрами волны и радиусом кривизны поверхности. В последующем эта энергия расходуется на образование поверхностной волны. Остальная часть основного возмущения взаимодействует с трещиной таким образом, что в окрестности ее вершины формируется розетка напряжений, соответствующая деформации поперечного сдвига (фиг. 5, е). При определенной интенсивности напряжений происходит развитие трещины в направлении градиента максимальных касательных напряжений.

Обращает на себя внимание тот факт, что развитие трещины происходит не в теневой области, как при воздействии продольной волны, распространяющейся вдоль одного из берегов трещины [1], а со стороны воздействия волны. Трещина растет под углом  $70-80^\circ$  к исходному направлению. После дифракции поверхностной волны на двугранном угле, образованном криволинейной поверхностью и плоскостью трещины, наблюдается повторное возрастание напряжений в вершине вновь образовавшейся трещины, а спустя несколько микросекунд начинается дифракция отраженной поверхностной волны, распространяющейся вдоль нижнего берега трещины на двугранном угле, образованном изломом трещины. Несмотря на слабую интенсивность отраженной волны, она вызывает концентрацию напряжений, достаточную для образования трещины из вершины двугранного угла под углом  $70-80^\circ$  к исходному направлению трещины, но в противоположную сторону относительно первоначального подрастания трещины. Таким образом, окончательная картина разрушения аналогична картине ветвления трещины.

На участке  $\alpha=135^\circ$  энергия волны локализуется в приповерхностном слое и трещина глубиной  $l=10$  мм становится существенным барьером на пути ее распространения (фиг. 5, з): примерно половина энергии отражается от трещины. Волна выходит в эту область в виде двух поверхностных импульсов с одинаковым порядком следования фаз сжатия и растяжения (см. фиг. 3, д). Их выход на трещину сопровождается возникновением в вершине сдвиговых деформаций (фиг. 5, з, кадры 6, 10). В остальных случаях концентрация динамических напряжений в вершине определяется взаимодействием релеевских волн, образовавшихся в результате дифракции поверхностной волны на двугранном угле, заключенном между берегом трещины и выпуклой поверхностью.

Криволинейность поверхности влияет не только на механизм формирования напряженно-деформированного состояния, но и на концентрацию динамических напряжений в вершине трещины. На фиг. 6 представлено изменение во времени максимальных касательных напряжений (в Па) в устье трещины длиной 10 мм, расположенной по нормали к выпуклой поверхности на участках  $\alpha=45, 90$  и  $135^\circ$  (кривые 1, 2, 3; время в мкс). Они показывают, что кривизна поверхности усиливает напряжения и приводит к возникновению дополнительных флуктуаций энергии в вершине трещины в отличие от данных, приведенных в [3]. Флуктуации вызваны выходом в устье трещины различных типов волн, которые вызывают динамические поля с характерным для их воздействия направлением градиента максимальных касательных напряжений. При достижении величины напряжений, превышающих динамический предел прочности, происходит подрастание трещины в направлении градиента максимальных касательных напряжений. Выход последующих возмущений вызывает наряду с многократным подрастанием исходной трещины возникновение новой из вершины внутреннего двугранного угла, образованного исходной и первоначальной подрощей трещинами. Это, в конечном счете, создает картину разрушения, аналогичную ветвлению трещины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Володарская Ш. Г., Гузь И. С., Куткин И. А., Финкель В. М. Исследование взаимодействия волны напряжений со стационарной макротрещиной в упругопластических и квазиупругих материалах. — ПМТФ, 1971, № 3, с. 100–105.
2. Гузь И. С. О взаимодействии поверхностных волн с краевыми трещинами. — Докл. АН СССР, 1973, т. 209, № 6, с. 1326–1329.
3. Гузь И. С., Финкель В. М., Чернов Г. А. Некоторые результаты исследования взаимодействия релеевских импульсов с краевыми трещинами. — ПМТФ, 1972, № 6, с. 145–151.
4. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.