

5. Таблицы физических величин. М., Атомиздат, 1976.
6. Альтшулер Л. В., Корнер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнение состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. — ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 3.
7. Батюков Ю. В., Вишневецкий Е. Д. Аппаратура для измерения импульсных давлений пьезорезистивными датчиками в диапазоне 0,1—20 ГПа. — В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., изд. ВНИИФТРИ, 1976.
8. Бетехтин В. И., Журков С. Н. Временная и температурная зависимость прочности твердых тел. — «Проблемы прочности», 1971, № 2.
9. Златин Н. А., Иоффе Б. С. О временной зависимости сопротивления отрыву при отколе. — ЖТФ, 1972, XLII, № 8.
10. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении. — ФГВ, 1975, № 3.

УДК 539.3.534.231.1

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ С ТРЕЩИНОЙ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ВОГНУТОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

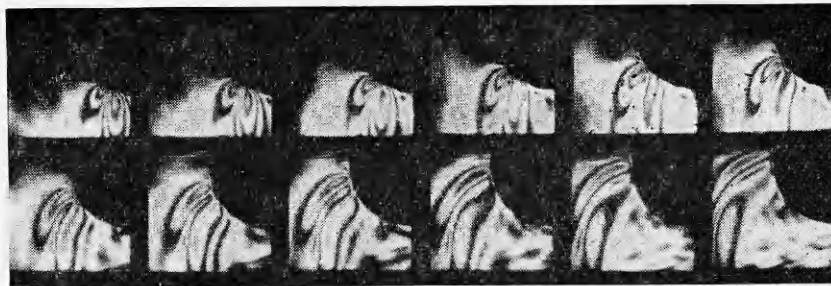
И. С. Гузь, В. Н. Катанчик

(Харьков)

Взаимодействие рэлеевской волны со стационарной трещиной, расположенной на прямолинейной поверхности, рассматривалось в работах [1, 2]. Показано, что поверхностная волна при определенных условиях может вызвать динамические напряжения, достаточные для развития трещины. Однако отсутствуют исследования, в которых изучались бы вопросы взаимодействия поверхностной волны с трещиной, расположенной на криволинейном полупространстве, хотя на практике такой случай встречается чаще.

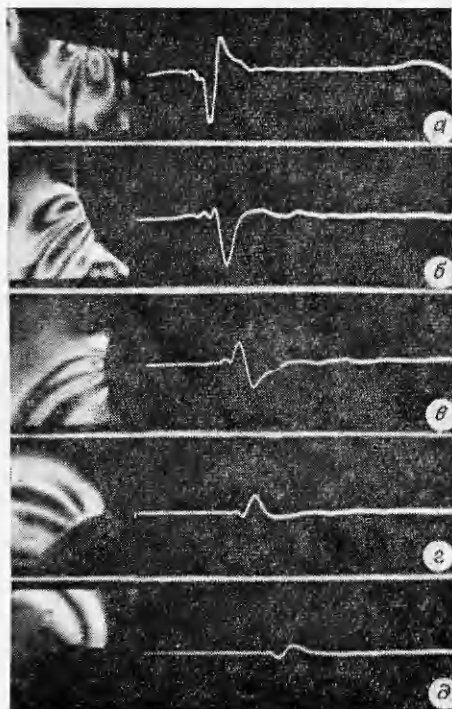
Данная работа методом динамической фотоупругости рассматривает взаимодействие поверхностной волны с краевой трещиной, расположенной вдоль и по нормали к вогнутому полупространству. Исследования проводились на образцах из полиметилметакрилата с размерами $350 \times 400 \times 15$ мм. Поверхностная волна длительностью до 50 мкс возбуждалась точечным микровзрывом на линейном участке образца, сопряженным с криволинейным. Взаимодействие поверхностной волны с трещиной регистрировалось в циркулярно-поляризованном свете скоростной кинокамерой СФР-1 с частотой $1,5 \cdot 10^6$ кадр/с.

Вначале рассматривалось распространение поверхностной волны вдоль вогнутого полупространства без трещины, а затем ее взаимодействие с трещиной. Кинограммы, иллюстрирующие распространение поверхностной волны вдоль вогнутого полупространства постоянного радиуса кривизны ($R = 50$ мм), приведены на фиг. 1. Они показывают, что при распространении волны Рэлея вдоль прямолинейного полупространства распределение напряжений в волне имеет сложную форму: три розетки напряжений, две из которых расположены непосредственно у поверхности полупространства впереди и позади основного возмущения. При движении волны по криволинейному полупространству происходит непрерывное перераспределение упругой энергии в поверхностной волне. На участке $0 < \alpha < 90^\circ$ (α — центральный угол) вначале наблюдается разворот и усиление приповерхностной розетки, расположенной впереди основного возмущения, за счет частичного ослабления последнего и второй приповерхностной розетки, а затем преобразование основного возмущения в объемную волну, распространяющуюся со скоростью по-



Ф и г. 1

перечной. Следует заметить, что независимо от радиуса кривизны (рассматривались $R = 10; 25; 50$ и 75 мм) преобразование поперечной волны в поперечную происходит при $\alpha = 90^\circ$. Тензометрия динамических напряжений на прямолинейном участке полупространства, вызванных поверхностной волной, показывает примерно одинаковую длительность фаз сжатия и растяжения в рэлеевском импульсе (фиг. 2, а), т. е. $T_c = T_p = 0,5 T$, а амплитуды сжимающей и растягивающей составляющих напряжений относятся как $1 : 1,5$. На фиг. 2, б — д показаны осциллограммы поверхностных напряжений и соответствующие им кинокадры распределения максимальных касательных напряжений в волне при прохождении участков $\alpha = 45, 90, 135$ и 180° . Осциллограммы получены при различном времени развертки. Они показывают, что при движении волны на участке $0 < \alpha < 45^\circ$ уменьшается амплитуда сжимающих напряжений и при $\alpha = 45^\circ$ в поверхностной волне практически имеются лишь растягивающие напряжения. Это наглядно демонстрирует и картина распределения максимальных касательных напряжений. При дальнейшем перемещении волны вперед фазы растяжения появляется составляющая сжимающих напряжений. Когда $\alpha = 90^\circ$, на поверхности возникает напряжение, соответствующее по форме волне Рэлея, но с измененным порядком следования фаз сжатия и растяжения, т. е. если раньше вперед идущей розетке соответствовали растягивающие напряжения, то теперь — сжимающие. При этом соотношение растягивающей и сжимающей составляющих напряжений оставалось прежним, а длительность $T_c = 0,5 T_p$.



Ф и г. 2

На участке $90^\circ < \alpha < 135^\circ$ происходит вновь перераспределение упругой энергии, в результате при $\alpha = 135^\circ$ поверхностная волна содержит лишь фазу сжатия. В дальнейшем при $135^\circ < \alpha < 180^\circ$ наблюдается обратное распределение упругой энергии и на участке $\alpha = 180^\circ$ распределе-

ние напряжений на криволинейной поверхности полностью соответствует рэлеевскому с одинаковой длительностью фаз $T_p = T_c = 0.25 T$.

Наблюдаемые выше изменения напряжений в поверхностной волне происходят за счет изменения плоскости полупространства относительно направления распространения волны.

Представляло интерес рассмотреть взаимодействие такой волны с трещиной, расположенной на вогнутой поверхности. Учитывая, что на участках $0 < \alpha < 90^\circ$ и $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ волна претерпевает примерно одинаковые изменения, рассматривали лишь два случая: расположение трещины на участке $\alpha = 45^\circ$ и 90° , т. е. в тех точках, где ранее проводилась тензометрия динамических напряжений. При $\alpha = 45^\circ$ и расположении трещины по нормали к полупространству процесс взаимодействия ее с поверхностной волной включает явления дифракции, отражения и преобразование поверхностной волны в объемную. Кинограммы, иллюстрирующие эти явления, представлены на фиг. 3 (а — в — трещины глубиной соответственно 5; 10 и 15 мм, расположенные на участке $\alpha = 45^\circ$; г — трещина длиной 10 мм, расположенная на участке $\alpha = 90^\circ$). Здесь наглядно показано влияние глубины трещины на взаимодействие с поверхностной волной. Из кинограмм видно, что в случае трещины глубиной 5 мм динамические напряжения в ее вершине вначале возникают в результате взаимодействия приповерхностной розетки напряжений, расположенной впереди основного возмущения. В формируемом поле распределение напряжений стремится к картине, возникающей при воздействии продольной волны, распространяющейся вдоль одного из берегов трещины [3]. Градиент касательных напряжений так же, как и при воздействии продольной волны, направлен под углом $80 - 85^\circ$ к направлению трещины.

Выход основного возмущения на вершину трещины не вызывает заметного возрастания напряжений. Оно легко скользит вдоль трещины,



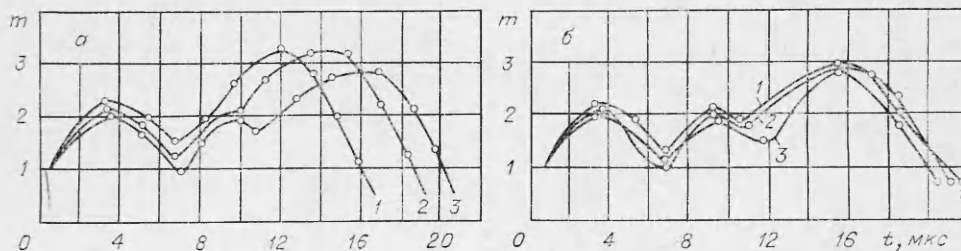
Ф и г. 3

а затем, отрываясь от вершины, преобразуется в поперечную волну. Существенное увеличение напряжений в устье трещины образуется сразу же после ухода основного возмущения. При этом максимальные касательные напряжения располагаются так, что их градиент лежит на продолжении трещины. Это означает, что для стимулирования развития трещины потребуются незначительные энергетические затраты. Такое поле напряжений возникает в вершине трещины при воздействии рэлеевской волны [4]. Однако в данном случае малые размеры трещины не позволяют ее наблюдать.

Увеличение длины трещины ($l = 10; 15$ мм) не вызывает заметного возрастания напряжений, но происходят некоторые изменения во взаимодействии волны с трещиной: усиливается отражение основного возмущения, имеет место временное разделение воздействия на трещину приповерхностной розетки, основного возмущения и рэлеевской волны, возникающей на одном из берегов трещины в результате дифракции основного возмущения на двугранном угле, образованном плоскостью трещины и свободным полупространством (фиг. 3, в).

Интересной особенностью является то, что в рассматриваемом случае трещина оказывается ориентированной вдоль поверхностной розетки, благодаря чему создается условие выхода этого возмущения на трещину без дифракции на двугранном угле. Из анализа поля напряжений, возникающего в вершине трещины, можно заключить, что смещения в самой розетке напряжений также направлены вдоль трещины. Это приводит к тому, что динамические напряжения, возникающие в данном случае, оказываются большими, чем при воздействии рэлеевской волны на трещину, расположенную по нормали к прямолинейному полупространству [2]. Следовательно, при прочих равных условиях кривизна полупространства усиливает динамические напряжения в вершине трещины.

Рассматриваемые трещины по отношению к основному возмущению лежат под некоторым углом, что приводит к одновременной дифракции основного возмущения на двугранном угле и вершине трещины. Дифракция на двугранном угле сопровождается возбуждением на его гранях поверхностных волн, а дифракция на вершине трещины, создавая незначительные напряжения в ее окрестности, преобразует основное возмущение в поперечную волну. Таким образом, энергия основного возмущения делится на три части: одна отражается в виде поверхностной волны, вторая излучается в объем с помощью поперечной, а третья движется к вершине в форме волны Рэлея. Выход последней на вершину вызывает усиление динамических напряжений, распределение которых характерно для этого типа волн. На фиг. 4, а (кривые 1 — 3 соответствуют длине трещины $l = 5; 10; 15$ мм при радиусе закругления $R = 50$ мм) показано изменение концентрации напряжений во времени для трещин различной



Ф и г. 4

глубины, где видно, что увеличение размеров трещины не приводит к возрастанию напряжений, а увеличивает время взаимодействия волны с трещиной и вызывает дополнительные флуктуации напряжений в ее вершине. Следует заметить, что увеличение размера трещины также снижает эффект влияния кривизны полупространства на взаимодействие волны с трещиной и формирование динамических напряжений в ее вершине, поскольку при выходе на прямолинейную поверхность трещины рассматриваемая волна преобразуется в рэлеевскую.

Весьма примечательна картина взаимодействия поверхностной волны с трещиной, расположенной на участке $\alpha = 90^\circ$. В эту область полупространства волна выходит ослабленной примерно вдвое в результате преобразования основного возмущения в поперечную волну. Само по себе отделение поперечной волны практически не влияет на формирование напряженного состояния в устье трещины. Динамические напряжения вызывает образовавшаяся новая поверхностная волна с измененной полярностью фаз сжатия и растяжения в приповерхностных розетках. При этом выход первой приповерхностной розетки также не сопровождается усилением напряжений, а если они и возникают, то настолько слабые, что не регистрируются выбранной методикой. Выход основного возмущения приводит к формированию напряжений, характерных для деформации сдвига вдоль трещины, т. е. реализуются условия, при которых направления трещины и смещений в основном возмущении совпадают. После дифракции основного возмущения на вершине трещины в ее окрестности формируется розетка напряжений, характерная для деформации отрыва, в результате впереди вершины трещины возникает «нож напряжений». Такая картина создается при движении трещины со скоростью, близкой к рэлеевской, или в случае одновременного воздействия двух рэлеевских волн, распространяющихся по обоим берегам трещины [2]. Вероятно, воздействие исследуемой волны на вершину трещины приводит к возбуждению рэлеевских волн, распространяющихся от вершины трещины, и тем самым создает регистрируемую картину напряжений, т. е. в данном случае реализуется обратная задача. Нет сомнения в том, что при достижении концентрации напряжений, достаточной для роста трещины, ее развитие будет протекать с большой скоростью. Полученные кинограммы позволяют установить еще одну особенность: дифракция волны приводит к повторному преобразованию поверхностной волны в поперечную, распространяющуюся под углом 90° к направлению движения первой поперечной волны.

Чтобы исключить влияние двугранного угла на исследуемые процессы, рассматривали трещины, ориентированные вдоль вогнутого полупространства. Кинограммы, иллюстрирующие этот случай, представлены на фиг. 5. Они показывают, что в процесс дифракции вовлекаются лишь приповерхностные розетки напряжений, а основное возмущение после выхода волны на вершину полностью преобразуется в поперечную волну.

При расположении трещины на участке $\alpha = 45^\circ$ дифракция волны создает в ее вершине динамические напряжения, характерные для воздействия продольной волны, падающей под некоторым углом к плоскости трещины. Величина динамических напряжений оказывается незначительной. На основании этого можно заключить, что в процессе формирования динамического поля напряжений в вершине трещины участвует лишь незначительная часть упругой энергии, переносимой поверхностной волной, именно та часть, которая вызывает смещения частиц среды, направленные под некоторым углом к плоскости трещины. Процесс формирования поля напряжений в ее вершине сопровождается интенсивным излучением упругих волн. Это можно проследить по уходящим изохромам и



Ф и г. 5

на это указывает ослабление дифрагировавшей волны. Обращает на себя внимание тот факт, что излучение упругой энергии в объем происходит дважды с некоторым временным разделением: в результате дифракции приповерхностной розетки и отделения основного возмущения.

При расположении трещины на участке $\alpha = 90^\circ$, несмотря на существенное ослабление волны (примерно вдвое), в ее вершине возникают динамические напряжения, более интенсивные, чем в вышерассмотренном случае. Это происходит в результате изменения фронта поверхностной волны и возникновения условий, при которых смещение частиц во фронте распространяющейся волны направлено под малым углом к плоскости трещины. Интересной особенностью является то, что на этом участке кривизны происходит изменение фазы поверхностной волны и создаваемое поле напряжений в устье трещины обусловлено воздействием фазы растяжения.

Общей характерной особенностью для всех рассматриваемых случаев является изменение волнового фронта и распределение максимальных касательных напряжений в волне в результате дифракции. Сложная картина напряжений возникает вследствие образования нескольких типов волн, распространяющихся с различными скоростями и имеющих свои особенности взаимодействия с трещиной. Поэтому происходит непрерывное изменение напряжений в вершине трещины во времени и пространстве. Кроме того, общим для всех рассматриваемых случаев является то, что изменение радиуса кривизны полупространства в пределах $R = 10-75$ мм не вызывает существенного изменения во взаимодействии волны с трещиной (см. фиг. 4, б, кривые 1—3 соответствуют $R = 25; 50; 75$ мм при $l = 15$ мм).

Увеличение интенсивности поверхностной волны приводит к развитию трещины (фиг. 6), при этом ее подрастание происходит при воздей-



Ф и г. 6

ствии фазы растяжения или в результате формирования поля напряжений, создающего растягивающие напряжения в вершине трещины.

Поступила 3 IV 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузь И. С. О взаимодействии поверхностных волн с краевыми трещинами. — «Докл. АН СССР», 1973, т. 209, № 6.
2. Гузь И. С., Финкель В. М., Червов Г. А. Некоторые результаты исследования взаимодействия рэлеевских импульсов с краевыми трещинами. — ПМТФ, 1972, № 6.
3. Володарская Ш. Г., Гузь И. С., Куткин И. А., Финкель В. М. Исследование взаимодействия волн напряжений со стационарной макротрещиной в упругопластических и квазихрупких материалах. — ПМТФ, 1971, № 3.
4. Гузь И. С. Влияние ориентации краевой трещины на прохождение поверхностных волн. — ПМТФ, 1973, № 5.

УДК 539.374

О ХАРАКТЕРЕ СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛОСТИ, РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ В ДИЛАТИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

С. З. Дунин, В. К. Сироткин, Е. В. Сумин

(Москва)

При расширении газовой полости в твердой среде могут происходить существенные изменения состояния этой среды. В частности, происходит разрушение хрупкой породы. Характер движения разрушенной породы существенно отличается от характера движения неразрушенной среды. Так, при сдвиговых деформациях происходит изменение плотности разрушенной породы. Это явление обычно называют дилатансией [1]. Кроме того, прочностные характеристики при разрушении породы также изменяются.

В данной работе рассмотрено напряженное состояние среды в окрестности расширяющейся полости в момент остановки. Исследовано влияние характеристик разрушенной породы на величину остаточных напряжений. Определен радиус зоны разрушения и исследована его зависимость от характеристик среды. Вычислен объем порового пространства в окрестности полости, образующегося за счет дилатансии. Исследован также характер напряженного состояния в упругопластических средах, которые не дилатируют при пластическом течении.

1. Рассмотрим адиабатическое расширение сферической газовой полости в упругопластической среде. В начальный момент времени по упругопластической среде начинает распространяться ударная волна, напряжение в которой превышает предел прочности среды на раздавливание, т. е. фронт ударной волны совпадает с фронтом разрушения. Предполагается, что на фронте ударной волны происходит уплотнение среды на некоторую постоянную величину ε , не зависящую от интенсивности волны [2]:

$$\varepsilon = (\rho - \rho_0)/\rho = \text{const.}$$

Между расширяющейся полостью и фронтом ударной волны происходит пластическое течение разрушенной среды, которая за счет дилатан-