

О ДЕЙСТВИИ ВЗРЫВА В ОРГАНИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ

А. Б. Багдасарян, С. С. Григорян

(Москва, Ереван)

Для проверки теоретических схем, принятых в работе С. С. Григоряна¹ для расчета действия взрыва в горной породе, рассматривается задача о действии взрыва в органическом стекле и приводится сравнение результатов вычислений с экспериментальными данными, имеющимися для этого случая в [1,2].

В работах [1,2] экспериментально изучалась физическая картина развития волн напряжений в ближней зоне взрыва, т. е. изменение скорости распространения фронта и параметров волн напряжений с расстоянием, а также особенности разрушений в материале. Результаты наших вычислений позволяют получить те же характеристики явления и сопоставить их с опытом.

Исходные данные для расчета были взяты из [1], а именно: плотность оргстекла $\rho_0 = 119.5 \text{ кг/сек}^2/\text{м}^4$, скорость продольных волн в оргстекле $c = 2700 \text{ м/сек}$, скорость поперечных волн $b = 1344 \text{ м/сек}$, прочность на разрыв (статическое одноосное напряжение) 650 кг/см^2 , прочность на сжатие 900 кг/см^2 , начальное давление продуктов взрыва (среднее по начальному объему) $p_0 = 8 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$, гидростатическое давление $p_n = 1 \text{ кг/см}^2$, показатель адиабаты взрывчатого вещества (прессованный тэн) $\gamma = 3$.

Для расчета параметров взрывной волны в непосредственной окрестности полости было принято предположение, что там под действием очень больших давлений материал на фронте ударной волны уплотняется на постоянную величину. Значение этого уплотнения в расчетах было принято равным $\rho_1/\rho_0 = 1.3$. Далее было принято, что за фронтом ударной волны среда несжимаема и находится в состоянии пластического течения. Условие пластичности было принято в виде $\sigma_a = \alpha \sigma_r$.

Значение α было принято равным 0.51, т. е. значению $\sigma_a/\sigma_r = 1-2 \gamma^2$ ($\gamma = b/c$) для плоской упругой волны, приведенному в [1].

На начальной стадии движения ударная волна будет сверхзвуковой, поэтому отмеченных выше данных достаточно для расчета движения. Однако в некоторый момент времени скорость ударной волны сравняется со скоростью продольных волн в среде, после чего волна станет дозвуковой. На этой второй стадии необходимо для построения решения задачи сформулировать некоторое условие излучения упругих волн с поверхности фронта ударной волны. В качестве такого условия было принято соотношение $p \equiv -1/2 (\sigma_r + 2\sigma_a) = \text{const} = 600 \text{ кг/см}^2$. Это соотношение соответствует идеализированному условию разрушения пористых хрупких материалов, когда разрушение происходит под действием только гидростатического давления. Хотя применимость такого условия для оргстекла, с физической точки зрения, весьма сомнительна, однако, как показывают результаты выполненных нами многочисленных расчетов при разнообразных условиях разрушения, влияние вида этого условия на решение задачи на стадии дозвукового распространения ударной волны не очень существенно, поэтому при расчете конкретной задачи для оргстекла нами было принято указанное выше условие как одно из возможных. Наконец, условие разрушения для стадии, когда образуются радиальные трещины, было принято в виде $\sigma_a = \text{const} = 650 \text{ кг/см}^2$.

Сказанное выше позволяет схематизировать процессы распространения взрывной волны и разрушения в органическом стекле в виде смены последовательных стадий.

1. Сверхзвуковая ударная волна уплотнения распространяется по невозмущенной среде, а материал между фронтом волны и взрывной полостью испытывает пластическое течение.

2. Фронт ударной волны распространяется с дозвуковой скоростью и излучает упругую волну; пластическое течение за ударной волной продолжается.

3. Ударная волна истощилась (выродилась в контактный разрыв), между полостью и контактным разрывом продолжается пластическое течение, но нового раздавливания среды не происходит; контактный разрыв излучает упругую волну. Эта стадия длится до тех пор, пока на поверхности контактного разрыва σ_a не достигнет значения $\sigma_* = 650 \text{ кг/см}^2$.

4. От поверхности контактного разрыва наружу распространяется ударный фронт, насаждающий в среде радиальные трещины. За контактным разрывом продолжается пластическое течение. Ударный фронт разрушения излучает упругую волну, на передней стороне фронта $\sigma_a = \sigma_*$.

5. Фронт разрушения остановился, новых разрушений не происходит, но излучение упругой волны и пластическое течение вокруг полости продолжают. Эта стадия продолжается до полного прекращения движения вокруг полости, а на бесконечность уходит упругая волна, излученная на второй — пятой стадиях.

Разбиение задачи на пять стадий, для которых отдельно формулируются последовательные математические задачи, подтверждается кинокадрами, иллюстрирующими

¹ Исследования по механике грунтов. Докт. дис., МГУ, 1965.

ми процесс развития волновой картины в блоке органического стекла. Существование устойчивых ударных волн следует из переменности скорости фронта разрушения. Эксперименты подтверждают предположения о фронте и зоне радиальных трещин [1,2]. Как отмечалось материал, находящийся в пластическом течении, считаем несжимаемым. Это позволяет получить выражения для напряжений и массовых скоростей в зависимости от расстояния до центра взрыва r , содержащие две неизвестные функции времени.

В области, разрушенной радиальными трещинами, напряжения и массовые скорости выражаются через другие две неизвестные функции, зависящие каждая от одной переменной, а в неразрушенной области, в области распространения упругой волны, — через одну.

Решение для каждой стадии сводится к определению указанных неизвестных функций, а также законов движения границы каверны, ударного фронта и фронта разрушения; эти законы должны удовлетворять некоторым уравнениям, которые получаются из условий сопряжения на фронтах ударной волны, разрушения на контактом разрыве и из условия на каверне.

Для каждой из первых трех стадий задача сводится к задаче Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, для четвертой стадии получается система функционально-дифференциальных уравнений, а для пятой стадии приходим к системе дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. Вообще говоря, задачу можно решить только численно, с использованием машин. Начальные данные для каждой последующей стадии определяются из решения для предшествующей стадии.

Ниже приводятся некоторые результаты расчетов на ЭЦВМ Стрела-4 ВЦ МГУ.

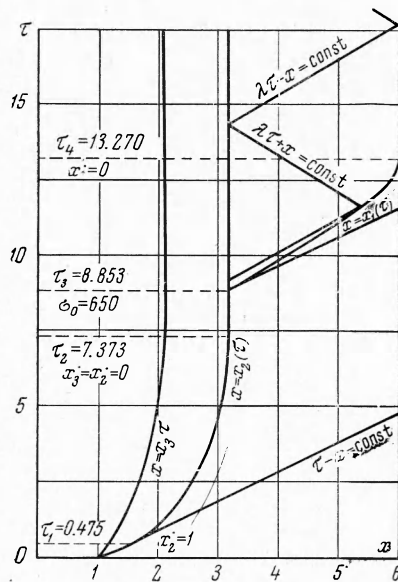
На фиг. 1 приведена рассчитанная картина в плоскости $x = r/r_0$, $\tau = ct/r_0$. Линия $x = x_3(\tau)$ изображает закон расширения каверны, линия $x = x_2(\tau)$ — закон распространения фронта ударной волны, линия $x = x_1(\tau)$ — закон распространения фронта разрушения. Здесь r_0 — радиус зарядной камеры, t — время, r — расстояние от центра заряда.

Полученная картина хорошо согласуется с экспериментальными фактами из [1], а именно пластическая область располагается в диапазоне от r_0 до $2 r_0$, область сплошной трещиноватости составляет до $5 r_0 - 6 r_0$ (здесь надо учесть расширение зарядной камеры до $2 r_0$ и последующее сужение ее почти до первоначальных размеров после раздробления на куски [2]), скорость фронта ударной волны меняется от 6000 до 2700 м/сек, а затем обращается в нуль, скорость фронта трещин равна $2500 - 3000$ м/сек, и т. д. (см. [1]).

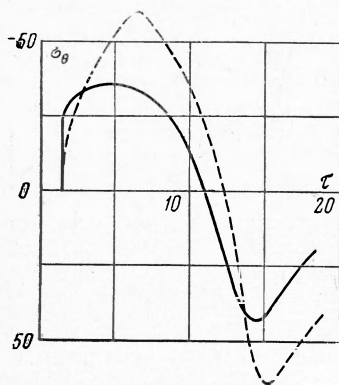
На фиг. 2 приведена зависимость изменения кольцевого напряжения σ_θ при $x = 18$ по данным вычислений (сплошная линия) и по единственной надежной осциллограмме из [1] (пунктирная линия).

Из фиг. 2 видно, что результаты вычисления по амплитуде занижены примерно в два раза по сравнению с опытом. Это, по-видимому, объясняется тем, что статические значения критических напряжений для органического стекла занижены по сравнению с динамическими значениями, как это отмечается в [1] (в работе [1] указано, что статическая прочность вдвое меньше динамической). Из фиг. 2 видно хорошее качественное соответствие между расчетными и опытными данными.

Как показывают вычисления, напряжения при различных значениях x растут до момента, когда данного сечения в упругой волне достигают напряжения, связанные с моментом начала образования зоны радиальных трещин, а затем затухают, колеблясь около значения, к которому они стремятся асимптотически (статические значения).

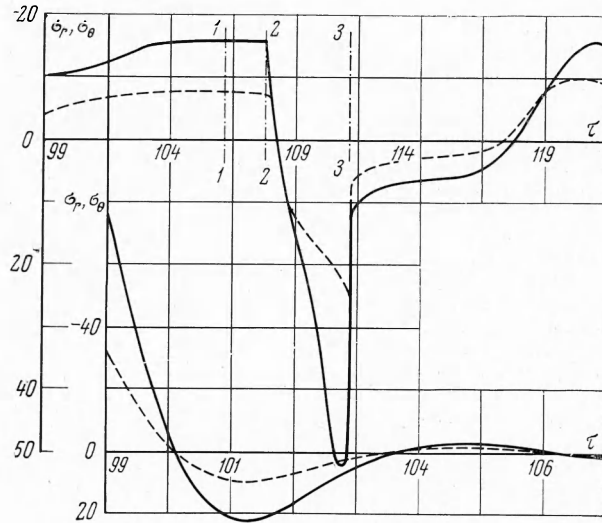


Фиг. 1



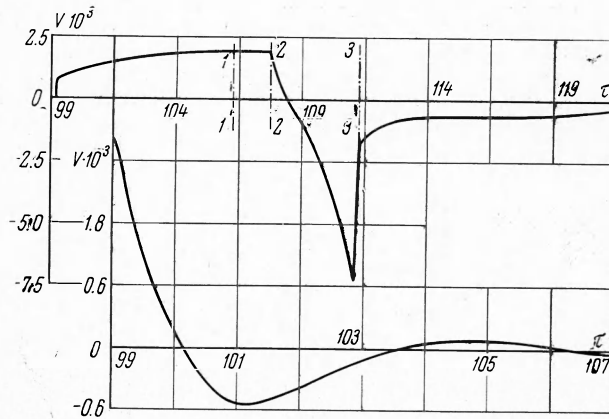
Фиг. 2

На фиг. 3 и 4 в верхней части приведены зависимости радиальных и кольцевых напряжений в кг/см^2 и массовых скоростей (фиг. 4) от времени для расстояния $x = 100$. На этих фигурах момент достижения расстояния $x = 100$ упругим возмущением, излученным в момент истощения фронта ударной волны ($x_2 = 0$), показан сечением 1-1, момент достижения этого же расстояния упругим возмущением, излученным в момент возникновения фронта разрушения, показан сечением 2-2, момент достижения упругим возмущением, излученным в момент остановки фронта разрушения, показан сечением 3-3.



Фиг. 3

амплитуд и длительности различных фаз на кривых существенно отличны. Затухание амплитуды для решения с учетом пластичности и разрушений происходит существенно интенсивней, чем в упругом решении (в первом случае первый максимум σ_r при $x = 100$ равен 15 кг/см^2 , в упругом решении он равен 800 кг/см^2). Продолжительности первой положительной фазы в обоих случаях соответственно равны примерно $10 \tau_0/c$ и $1.3 \tau_0/c$, т. е. отличаются на порядок. Таким образом, учет пластичности и разрушений вблизи очага взрыва приводит к тому, что излучаемая упругая волна оказывается весьма существенно видоизмененной, по сравнению с упругим случаем, как в качественном, так и в количественном отношении. Интересно отметить, что столь существенное изменение решения задачи, охватывающего значительные расстояния от очага взрыва, вызывается явлениями, локализованными в малой окрестности очага взрыва. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что, вопервых, теоретическая схема, принятая в работе, хорошо согласуется с экспериментом и, во-вторых, при решении задачи о действии взрыва в реальных твердых телах, обладающих хрупкостью (например, в горных породах), учет пластичности и хрупкости в непосредственной окрестности взрывной полости совершенно необходим.



Фиг. 4

Поступила 7 IX 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоголев М. В., Мыркин В. Г., Пархомов Г. В., Ханукаев А. Н. О ближней зоне взрыва сосредоточенного заряда. Тр. V Сессии Уч. совета по народнохозяйственному использованию взрыва, изд. Фрунзе, 1965.
2. Адушкин В. В., Сухотин А. П. О разрушении твердой среды взрывом. ПМТФ, 1961, № 4.