

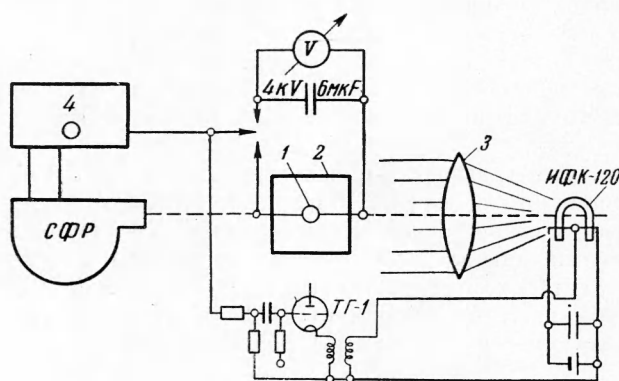
О РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДОЙ СРЕДЫ ВЗРЫВОМ

В. В. Адушкин, А. П. Сухотин

(Москва)

В работе рассматривается картина разрушения плексигласового блока при взрыве внутри его сферического заряда. Возникающее при взрыве движение обладает сферической симметрией, это облегчает наблюдения и интерпретацию результатов опыта. Заметим, что для изучения качественной картины разрушения выбор твердого тела, подвергаемого разрушению взрывом, не имеет существенного значения.

Приводимые в этой работе экспериментальные данные позволили выяснить некоторые стороны процесса разрушения твердого тела взрывом. Получена общая картина



Фиг. 1. Схема опытов

разрушения и оценены временные характеристики процесса. Показано, что в процессе разрушения (как во внутренней зоне, так и при отколе) нужно выделять две стороны: зарождение трещин и их развитие. Оказалось, что пространственно временные характеристики процесса разрушения существенно зависят от поведения материала в непосредственной близости от очага взрыва. Наличие пластической зоны около заряда эквивалентно увеличению размеров источника, излучающего упругую волну.

Описание экспериментов. В качестве твердого тела, подвергаемого разрушению взрывом, был выбран плексиглас (полиметилметакрилат). Приводим физические характеристики плексигласа, взятые из справочников [1]:

Плотность	1.16—1.20 г/см ³
Скорость звука	2800—3000 м/сек
Теплоемкость	0.35—0.40 кал/г·град
Теплопроводность	(1—10)·10 ⁻⁴ кал/см·сек·град
Прочность на разрыв	~1000 кг/см ²

Блоки склеивались из пластин плексигласа толщиной 30—50 мм клеем В-31-Ф9 или 3%-ным раствором плексигласа в дихлорэтаноле. Несколько опытов было сделано с монолитными блоками. Приводим размеры блоков, подвергнутых испытаниям:

$h =$	60	70	80	100	100	100	140	140	мм
$d =$	100	70	100	100	100	150	140	150	мм
$l =$	100	90	100	100	250	150	140	180	мм

В центре блока помещался сферический заряд прессованного ТЭНА весом 0.8 г и радиусом $r_0 = 5$ мм, или литой заряд ТГ-50 / 50 весом 24 г и радиусом $r_0 = 15$ мм. В опытах с монолитными блоками заряд помещался в скважине, которая запиралась резьбовой пробкой из плексигласа.

Развитие взрыва и разрушение блока фотографировалось в проходящем свете при помощи скоростного фоторегистра (СФР), который, кроме непрерывной развертки во времени, позволяет получать серию кадров с частотой съемки до 2 млн. кадров / сек. На фиг. 1 показана схема проведения опытов. Блок 2 устанавливался так, чтобы поверхность склейки была параллельна лучам света, идущим от импульсной лампы (ИФК-120) через конденсорную линзу 3. Подрыв заряда 1 взрывчатого вещества (ВВ) производился импульсом высокого напряжения, получаемым при разряде конденсатора КБГ-П ($C = 6 \text{ мкФ}$), заряженного до напряжения 4 кВ. Пробой разрядного промежутка в цепи подрыва инициируется электрическим импульсом, подаваемым от пульса управления 4(СФР). Момент его выдачи согласован с положением зеркала развертки. Этот же импульс включает подсветку.

Результаты опытов. На фиг. 2 приведены типичные кинокадры процесса разрушения блока $100 \times 100 \text{ мм}$. На фиг. 3 и 4 дана непрерывная развертка этого же процесса во времени в различных по размеру блоках (W обозначает расстояние от центра заряда до свободной поверхности). На снимках отчетливо видны фронт волны и зоны разрушения.

На фиг. 5 в координатах $r - t$ дана общая картина развития основных явлений при взрыве заряда 0.8 г ТЭНА в блоке плексигласа. Линия 1 представляет собой след фронта волны сжатия, которая отражается от свободной поверхности в виде волны растяжения (линия 2). Контур области 3 показывает расширение зарядной камеры во времени. Ее развитие прекращается примерно через 6 мксек, когда радиус достигает значения $2r_0$. Начиная с расстояния $3r_0$, спустя $\sim 6 \text{ мксек}$ после прохождения фронта волны сжатия, возникает новая область разрушения материала — область 4. Линия 4 на графике показывает развитие ее размеров во времени. Из графика фиг. 5 видно, что в блоке толщиной 100 мм ($20r_0$) влияние свободной поверхности (линия 2) на развитие области 4 отсутствует по крайней мере в течение 24 мксек.

Волна сжатия. График фиг. 5 и фотографии показывают, что скорость фронта волны сжатия переменна в области расстояний до $(5-6) r_0$. Примерный график зависимости скорости фронта от расстояния, полученный графическим дифференцированием линии 1, показан на фиг. 6. Пунктиром на графике отмечена величина скорости продольных звуковых волн в плексигласе. Из графика видно, что в области от $1 r_0$ до $(5-6) r_0$ скорость фронта волны сжатия изменяется от 5000—6000 м / сек до 2900 м / сек. Скорость фронта отраженной волны (линия 2 на фиг. 5) оказывается несколько меньше скорости продольных звуковых волн и равняется меньше 2600—2700 м / сек.

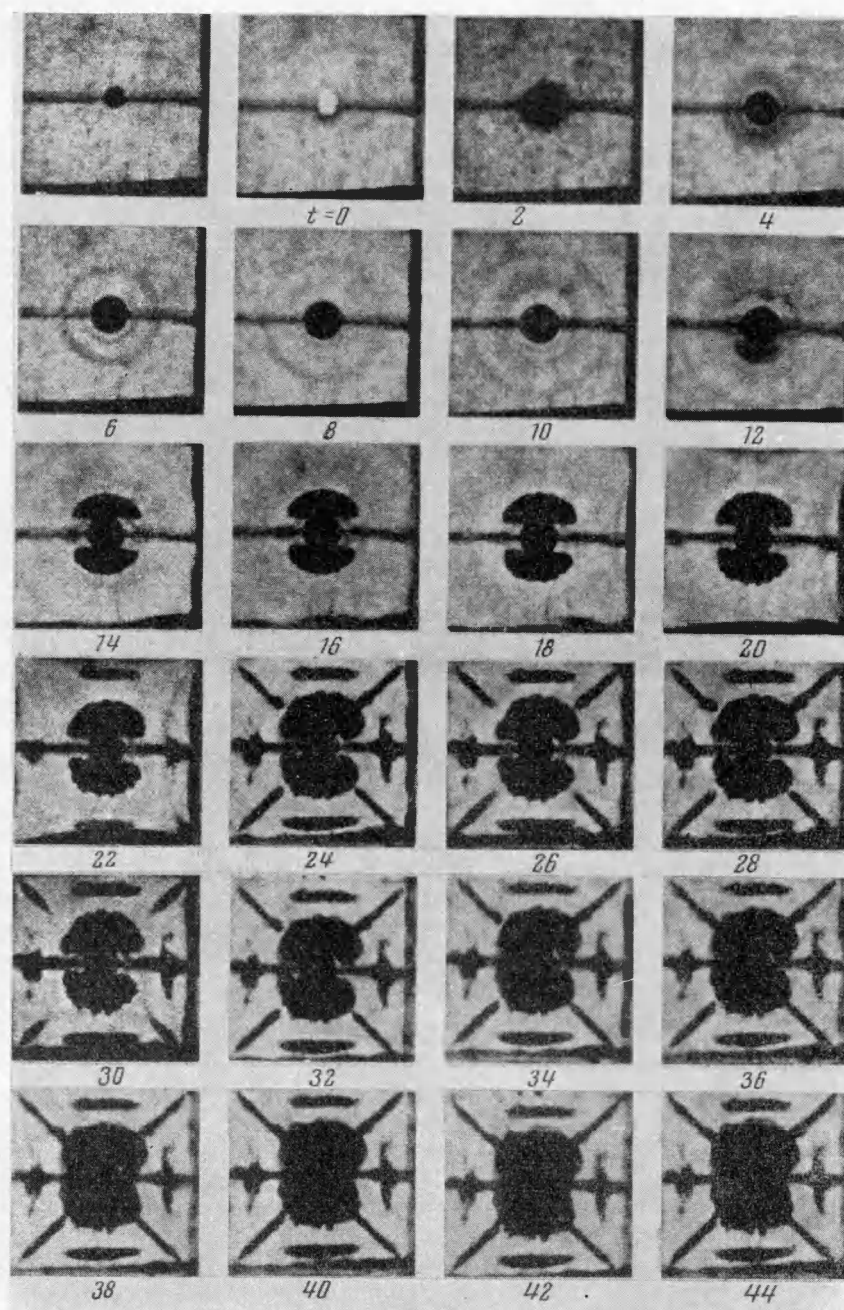
В отдельных опытах параллельно линии 1 видна еще одна линия (фиг. 7), происхождение которой не выяснено.

Величины массовых скоростей в волне сжатия могут быть оценены по начальным скоростям движения свободной поверхности V_0 , считая, что при отражении скорость удваивается. Начальные скорости движения свободной поверхности в момент отражения волны сжатия измерялись с точностью $\sim 10\%$. Приводим значения массовых скоростей $U = V_0/2 \text{ м / сек}$, а также оценки радиальных напряжений во фронте волны, вычисленные по формуле $\sigma_{rr} = \rho c U$:

$r/r_0 =$	5	6.8	7.4	10	
$U =$	100	75	55	30	м/сек
$\sigma_{rr} =$	3500	2600	1900	1050	кг/см ²

Если принять, что на границе с зарядом давление в волне по порядку величины равно 10^5 кг / см^2 , то можно написать приближенно закон затухания максимального давления в волне сжатия с расстоянием в виде

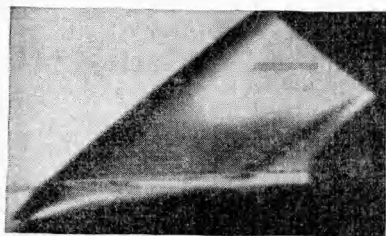
$$P \approx \frac{10^5}{(r/r_0)^2} \quad (1)$$



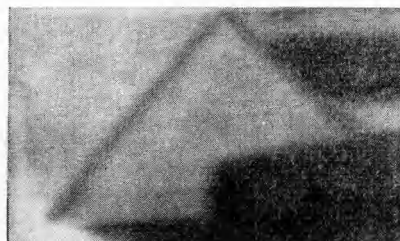
Фиг. 2. Фотографии развития взрыва заряда ТЭНА $C = 0.8$ г в склеенном блоке плексигласа. Около кадров указано время, истекшее с момента взрыва, в $\mu\text{сек}$

Разрушение блока. Рассмотрение кусков разбитого блока позволило уточнить некоторые детали видимой на кинокадрах картины. Во всех опытах с блоками из плексигласа независимо от их размера наблюдалась следующая типичная картина разрушений. Плексиглас в диапазоне расстояний от $1 r_0$ до $3 r_0$ не имеет никаких видимых разрушений, оставаясь прозрачным. При этом вблизи заряда имеет место заметный разогрев ма-

териала ($\Delta t \approx 10^\circ \text{C}$). Объяснить повышение температуры за счет теплопроводности, как показали оценки, невозможно. Нужно, по-видимому, полагать, что разогрев материала происходит за счет ударного сжатия

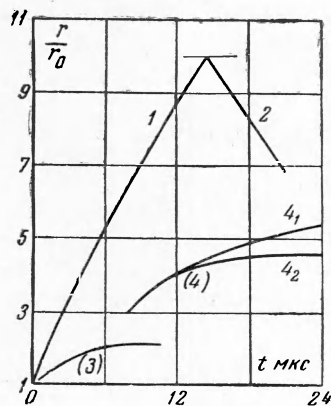


Фиг. 3. Взрыв заряда ТГ = 50/50
 $C = 24 \text{ г}$ в блоке плексигласа
($2W = 10 r_0$)



Фиг. 4. Взрыв заряда ТЭНА $C=0.8 \text{ г}$
в блоке плексигласа ($2W = 20 r_0$)

и пластических деформаций за фронтом волны. На расстояниях $(3-4)r_0$ наблюдается шаровой пояс, состоящий из большого количества мелких радиально ориентированных трещин. Число этих трещин на единицу поверхности убывает с расстоянием. Ориентация трещин свидетельствует о том, что они появились в результате действия азимутальных растягивающих напряжений.



Фиг. 5. $r - t$ — диаграмма развития взрыва в блоке толщиной $2W = 20 r_0$

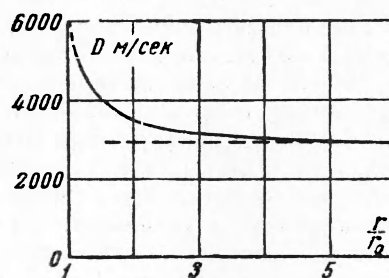


Рис. 6. Зависимость скорости фронта волны сжатия от расстояния

Интересно отметить, что точно такой же характер имеют разрушения, возникающие при отражении от свободной поверхности волны сжатия (откол). Сходство вида трещин в откольной и центральной зонах подтверждает, что причиной возникновения радиальных трещин в области $(3-4)r_0$ являются растягивающие напряжения. Уже отмечалось (график фиг. 5, область 4), что радиальные трещины в области $(3-4)r_0$ появляются спустя примерно 6 мксек после прохождения фронта волны сжатия. Это означает, что азимутальные растягивающие напряжения во фронте волны сжатия отсутствуют. Они возникают позже в результате радиального перемещения материала в сферически расходящейся волне сжатия. На фиг. 8 представлена зависимость скорости движения фронта радиальных трещин от расстояния, полученная графическим дифференцированием кривой 4₁ на графике фиг. 5. Из графика фиг. 8 следует, что фронт радиальных трещин после своего возникновения на расстоянии $3r_0$ имеет скорость около 2000 м / сек, которая уменьшается до 1000 м / сек на расстоянии $4r_0$. Величина скорости в указанной области, вероятно, определяется распро-

странением некоторой фазы растягивающих азимутальных напряжений, а не собственной скоростью развития трещин. На это, в частности, указывает тот факт, что зона трещиноватости состоит из мелких отдельных трещин, не соединенных между собой в направлении распространения.

При $r > 4r_0$ наблюдается изменение характера разрушения; дальше развиваются лишь отдельные трещины, образующие волнообразного вида разлом. Их развитие происходит в среднем со скоростью, уменьшающейся от 1000 м/сек до 500 м/сек на расстоянии (5—6) r_0 . При дальнейшем распространении скорость трещин не меняется. По-видимому, в области выше $4r_0$ растягивающие напряжения в волне ослабевают настолько, что становятся недостаточными для зарождения новых трещин.

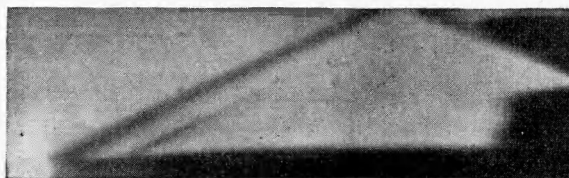


Рис. 7. Взрыв заряда ТЭНА $C = 0.8$ г в блоке плексигласа

Роль времени действия сжатых в каверне продуктов взрыва можно качественно выявить из сравнения с опытом, когда взрыв заряда производился в лунке на свободной поверхности пластины плексигласа толщиной 50 мм (10 r_0). Результат опыта нанесен на график фиг. 5, где кривая 4₂ показывает развитие во времени зоны радиальных трещин — область 4. Картина развития взрыва в этом случае получилась такой же, как и в случае взрыва внутри блока. Существенное отличие заключается в том, что одиночные радиальные трещины прекращают свой рост уже на расстоянии (4—5) r_0 . Это можно объяснить тем, что в случае взрыва на поверхности продукты взрыва имеют возможность свободно расширяться в атмосферу, в результате чего напряжения в материале уменьшаются.

Интересно отметить влияние склейки блоков на картину разрушения. Приведенные на фиг. 2 кинокадры относятся к блоку, склеенному дихлорэтаном. Видно, что склейка нарушает свойства плексигласа, образуя разгружающие поверхности. Опыты с блоками, склеенными при помощи клея В-31-Ф9, показывают, что полусферические области разрушений сближаются, и, наконец, результаты опыта в монолитном блоке говорят о том, что если свойства материала одинаковы во всех направлениях, то зона разрушений представляет шаровую поверхность. На фиг. 9 приведены кинокадры этого опыта с блоком 120×120 мм.

Расширение зарядной камеры. В центре блока на месте заряда ВВ вслед за вспышкой наблюдается появление сферического темного пятна — каверны (фиг. 2). На графике фиг. 5 каверну представляет область 3. Зависимость радиуса каверны r_k от времени показана на фиг. 10. Для сравнения на этом же графике приведены соответствующие зависимости для газового пузыря в воде и каверны в песке.

Интересно, что для указанных сред на начальном участке расширения получился примерно одинаковый закон движения

$$\frac{r_k}{r_0} = A \left(\frac{t}{c^{1/2}} \right)^{0.4} \quad (2)$$

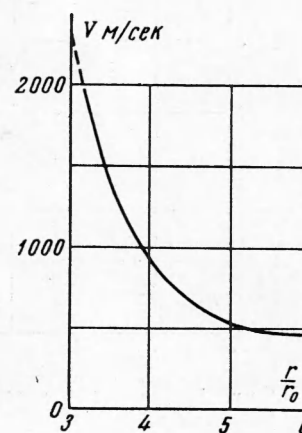


Рис. 8. Зависимость скорости распространения зоны радиальных трещин от расстояния

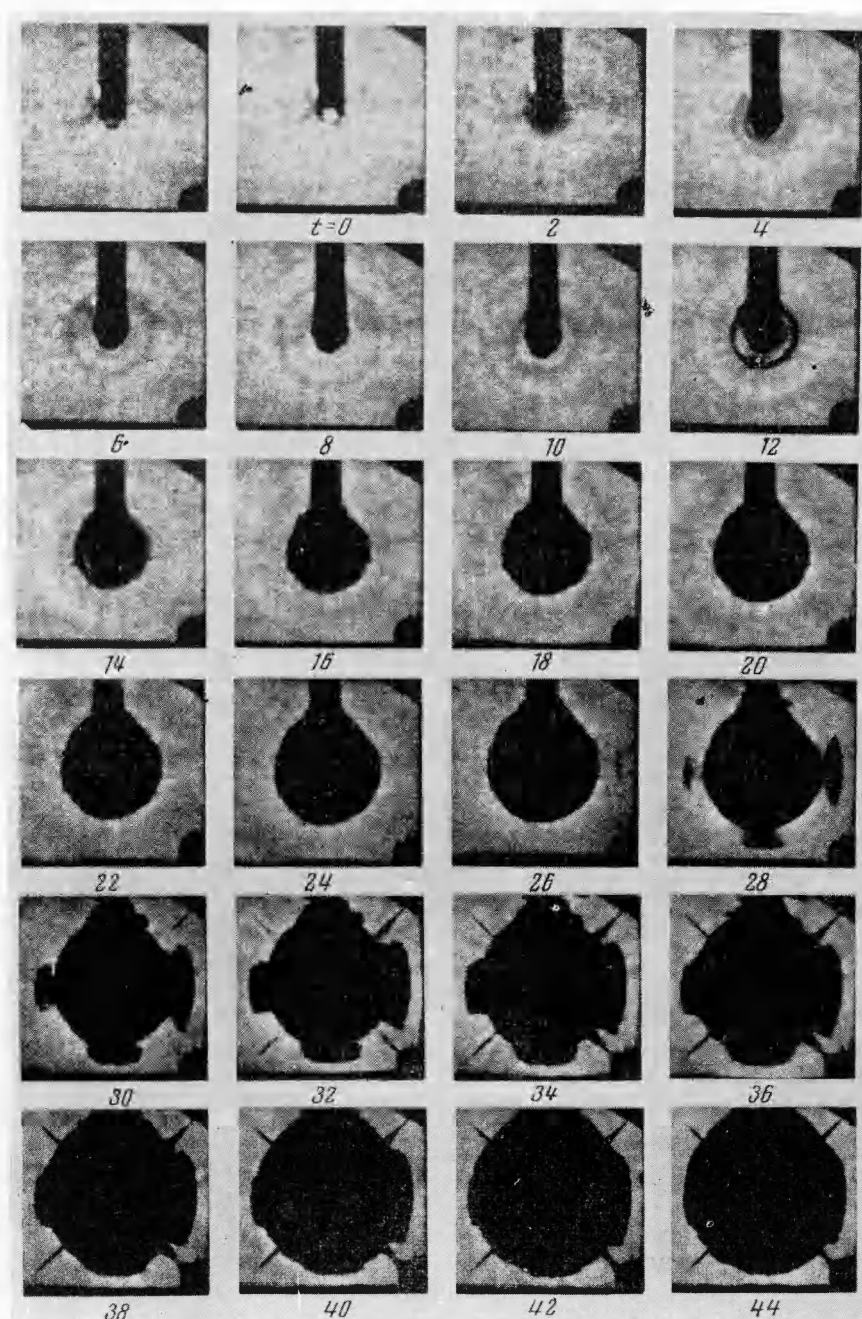


Рис. 9. Фотографии развития взрыва заряда ТЭНА $C = 0.8$ г в монолитном блоке плексигласа. Около кадров указано время, истекшее с момента взрыва, в мксек

В случае плексигласа максимальный радиус каверны по фотографиям достигает величины $2r_0$.

Измерения радиуса полости, в которой находился заряд ВВ, после опыта по осколкам блоков показывают, что радиус полости увеличивается в среднем только на 20% (расширение полости до $1.2 r_0$). Специальная проверка показала, что оптические эффекты здесь исключены. Такое на первый взгляд противоречивое поведение каверны можно, по-видимому, объ-

яснить известной из опыта способностью плексигласа при нагреве к большим обратимым деформациям. Под действием волны сжатия и давления продуктов взрыва нагретый плексиглас раздвигается до размера, наблюдаемого на фотографиях. Разрушение блока освобождает сжатые продукты

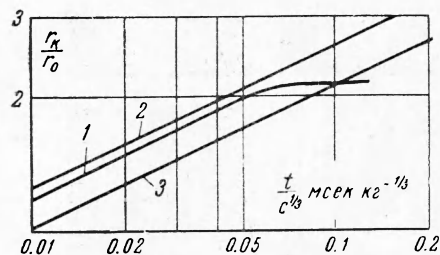


Рис. 10. Зависимость радиуса каверны от времени: 1 — плексиглас, $A = 270$; 2 — вода, $A = 290$; 3 — песок, $A = 230$

взрыва. Это приводит к тому, что упругие силы материала сжимают каверну до размера $1.2 r_0$.

Откол. Разрушение вблизи свободной поверхности блока (откол) вызывается растягивающим напряжением, которое возникает при отражении волны от свободной поверхности. Разрушение этого рода, наблюдаемое в настоящих экспериментах, возникало практически на фронте отраженной волны. Рассмотрение осколков после опыта показало, что в блоке плексигласа откольная трещина не является одиночной сплошной трещи-

ной, а представляет собой некоторую зону нарушенного материала толщиной 3—5 мм, состоящую из большого количества мелких трещин в форме линзочек или чешуек (размером 0.5—3.0 мм). Откольные трещинки ориентированы параллельно фронту отраженной волны растяжения и лишь в результате своего развития образуют плоскость раздела. В том случае, когда в наметившемся к отделению куске хватает запаса кинетической энергии, отдельные трещины границы откольной зоны растут, достигают свободной поверхности, и откольная арелочка отлетает.

Отмеченный вид откольного разрушения и тот факт, что откольные трещинки, появившись, развиваются во времени, заставляют пересмотреть часто используемое допущение о мгновенности разрушения материала. Нужно, по-видимому, в каждом конкретном

случае тщательно оценивать время разрушения. В предположении мгновенного разрушения головная часть импульса волны полностью отсекается трещиной. Некоторое запаздывание в образовании откольной трещины, обусловленное ее развитием, может привести к тому, что головная часть эюры волны в координатах напряжение — время будет менять свою форму в области, где развиваются откольные трещины. Это в свою очередь неизбежно повлечет за



Фиг. 11. Распределение радиальных составляющих напряжения за фронтом волны

собой изменение характера откольного разрушения в целом.

О применимости упругой модели среды при анализе взрыва в твердом теле. Рассмотрим простейшую задачу. В упругом безграничном пространстве с коэффициентом Пуассона $\sigma = 1/3$ в полости радиусом r_1 в момент времени $t = 0$ мгновенно возникает давление P_0 , которое затем остается постоянным. На фиг. 11 и 12 приведены результаты расчета в виде зависимостей

$$\sigma_{rr}/p_0 = f_1(r/r_1), \quad \sigma_{\theta\theta}/p_0 = f_2(r/r_1)$$

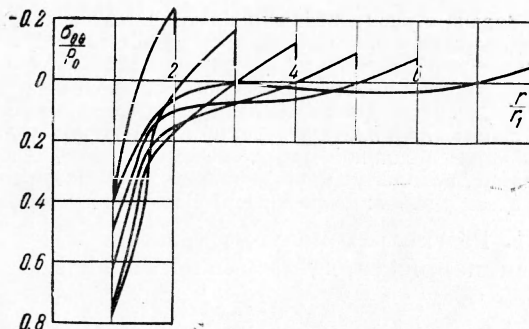
в различные моменты времени, где σ_{rr} — напряжение в радиальном направлении, а $\sigma_{\theta\theta}$ — напряжение в азимутальном направлении.

Сопоставим длину положительной фазы волны сжатия λ_+ , оцененной по толщине откольной плиточки δ , с расчетной величиной (фиг. 11). В опыте с блоком размером $2W = 20r_0$ ($r_0 = 5$ мм) толщина откольной плиточки равнялась 10 мм. В этом случае длина волны $\lambda_+ \simeq 2\delta = 20$ мм, что соответствует $4r_0$.

Из решения же задачи следует, что для этого случая $r = 10r_0$ величина $\lambda_+ = 1.3r_0 = 6.5$ мм, т. е. в опыте λ_+ значительно больше, чем это должно было бы быть в упругой среде.

Рассмотрение графика фиг. 12 показывает, что большие растягивающие напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ наблюдаются лишь в ближней зоне на расстояниях $(1.5-2)r_1$. За пределами этой зоны $\sigma_{\theta\theta}$ резко падает. Опыт, однако, показывает, что центральная зона разрушений имеет размер до $(3.5-4)r_0$. Таким образом, сравнение экспериментальных данных и результатов расчета по упругой модели свидетельствует о том, что эта модель не может быть применена для описания поведения материала во всем диапазоне расстояний.

Различие между опытом и расчетом, а также характер наблюдаемых разрушений материала говорят о том, что в ближней зоне материал ведет себя явно неупруго. Так, в области около $2.5 r_0$ наблюдается существенный разогрев материала, что указывает на наличие в этой зоне неупругих деформаций. По мере удаления от заряда напряжения в волне падают и можно ожидать, что с некоторого расстояния $r = r_*$ упругая модель среды будет, по-видимому, в какой-то мере, оправданной. Попробуем согласовать качественную картину, выбрав соответствующим образом радиус источника упругих колебаний r_1 . Если выбрать в качестве r_1 радиус пластической области $2.5 r_0$, то получим удовлетворительное согласие величины откольной тарелочки и расчетной длины волны, а также радиуса образования зародышей радиальных трещин и зоны интенсивных азимутальных напряжений. Можно полагать, что пластическое течение материала, наблюдаемое при взрыве, приводит к увеличению эффективного радиуса источника в упругой модели.



Фиг. 12. Распределение азимутальных составляющих напряжения за фронтом волны

Поступила 9 VI 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook of Chemistry and Physics. 37th Edition, 1955—1956. Chemical rubber publishing Co.