

Подставляя эти данные в формулу (7), получим $a = 19,6$ м. Радиус зоны дробления R_d , трещиноватости $R_{тр}$ получим, исходя из оценок, вытекающих из квазистатистического подхода к задаче о расширении полости [1]:

$$R_d = a \left(\frac{E}{\sigma^* (n+1)} \right)^{1/(n+1)} = 125 \text{ м},$$

$$R_{тр} = R_d \left(\frac{\sigma^*}{2\sigma_0} \right)^{1/2} = 376 \text{ м},$$

где σ_0 — величина прочности грунта на разрыв. Для эксперимента «Хардхет» можно взять $\sigma_0 = 70$ бар.

Полученные оценки находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными по взрыву «Хардхет» [2]. Пренебрежение ролью дилатансии приводит к завышению объема полости в 1,3 при $n = 1,5$ и в 1,06 раза при $n = 1,8$.

Поступила 5 VII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В. И. и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
2. Родин Г. Сейсмология ядерного взрыва. М., «Мир», 1974.
3. Николаевский В. Н. О связи объемных и сдвиговых пластических деформаций и об ударных волнах в мягких грунтах. — Докл. АН СССР, 1967, т. 177, № 3.
4. Буткович Т. Р. Влияние воды в горных породах на эффекты подземных ядерных взрывов. — В кн.: Подводные и подземные взрывы. М., «Мир», 1974.
5. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических давлений. М., «Наука», 1966.

УДК 620.178.3/7

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

Б. И. Абашкин, И. Х. Забиров, В. С. Лобанов, В. Г. Русин

(Москва)

При скоростном соударении плоских пластин в результате взаимодействия падающей и отраженных волн от контактных и свободных границ возникают растягивающие напряжения, которые могут привести к разрушению типа откола. Непосредственное экспериментальное измерение критических растягивающих напряжений и соответствующих деформаций в зоне откола связано с большими методическими трудностями, поэтому эти величины оценивают, исходя из различных косвенных измерений и некоторых допущений относительно поведения материала при растяжении с высокой скоростью деформирования. Указанной проблеме посвящен ряд работ (например, [1—8]), в которых экспериментально и аналитически исследуются откольные разрушения. Подробная библиография по данному вопросу приведена в [1, 7, 8]. Характерной особенностью указанных работ является применение упругой модели материала при определении откольных напряжений.

В данной работе предлагается экспериментально-теоретический способ определения кривой растяжения материала вплоть до откола с применением более сложной упругопластической модели твердого тела.

Основные уравнения и соотношения, описывающие одномерное нестационарное движение сплошной среды, записаны в форме Лагранжа—Эйлера и аналогичны используемым в работах [9, 10].

Уравнение движения

$$(1) \quad (1/V)\rho_0 du/dt = \partial\sigma/\partial x,$$

где ρ_0 — начальная плотность; u — массовая скорость; $-p + s = \sigma$ — полное напряжение; s — сдвиговая часть полного напряжения; p — объемное давление (шаровая часть тензора напряжения); $\rho_0/\rho = V$ — относительное сжатие.

Уравнение неразрывности

$$(2) \quad (1/V)dV/dt = \partial u/\partial x.$$

Уравнение энергии

$$(3) \quad dE/dt - Vs d\varepsilon/dt + p dV/dt = 0,$$

где $\varepsilon = \rho_0/\rho - 1$.

Уравнение девиатора напряжений

$$(4) \quad ds/dt = 2\mu(d\varepsilon/dt - (1/3V)dV/dt),$$

где μ — постоянная Ламэ.

Скорости деформации

$$(5) \quad d\varepsilon/dt = \partial u/\partial x.$$

Уравнение состояния в форме Ми—Грюнайзена

$$(6) \quad p_1 = p_H + \rho\Gamma(E - E_H),$$

где p_H, E_H — значения давления и внутренней энергии на ударной адиабате Гюгонио; Γ — коэффициент или функция Грюнайзена.

Гидродинамическая часть течения описывается моделью вязкой жидкости. При этом выражение для давления записывается в виде

$$(7) \quad p = p_1 + Q;$$

$$(8) \quad Q = \eta_1 \partial u/\partial x + (\partial u/\partial x)^2 \eta_2,$$

где η_1, η_2 — функции начальной плотности, объемной скорости звука и некоторых безразмерных параметров. Первый член в выражении (8) представляет собой физическую вязкость Навье — Стокса, второй — искусственную вязкость Неймана—Рихтмайера, которая осуществляет размазывание фронтов ударных волн на конечную ширину.

Пластическое состояние среды описывается соотношениями теории пластического течения. Условие пластичности выбрано в обобщенной форме Мизеса

$$(9) \quad I'_2 \geq K^2,$$

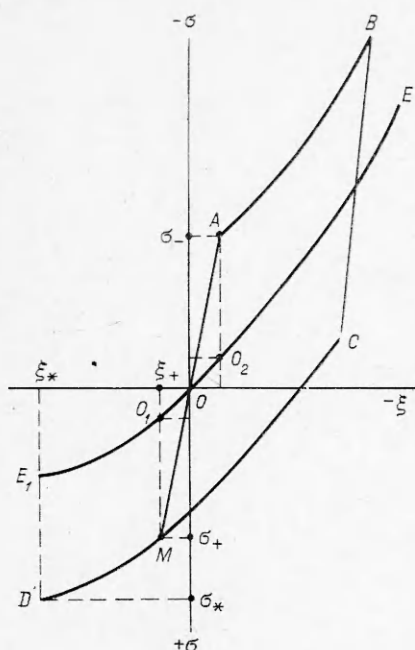
где I'_2 — второй инвариант девиатора тензора напряжений; K — некоторый функционал чистого сдвига или простого растяжения. Поверхность текучести представляет собой поверхность кругового конуса в координатах главных напряжений.

Условие возникновения откола выбрано в виде

$$(10) \quad \sigma \geq \sigma_*,$$

где σ_* — предел прочности при растяжении (откольная прочность).

Принят следующий критерий разрушения: происходит разрыв сплошности материала, если текущее растягивающее напряжение превосходит



Ф и г. 1

Т а б л и ц а 1

Материал	p_{*+} кбар	ξ_{*+}	n	β
Оргстекло	-0,7	-0,035	3,25	1,02
АМГ-6	-11	-0,022	1,19	1,0

некоторую характерную величину. Пластичность и откол описываются с помощью специально разработанных процедур корректировки напряженного состояния в заданной точке, подробное изложение которых приводится в [9, 10].

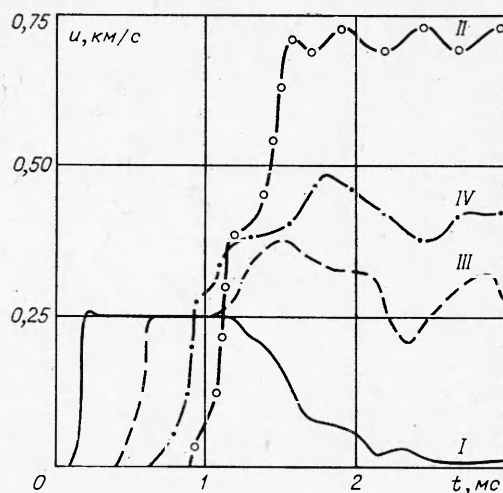
Приведенная выше система уравнений (1)–(7) вместе с условиями (8)–(10) и соответствующими начальными и граничными условиями образует замкнутую, корректно поставленную задачу. Начальные и граничные условия: в момент времени $t = 0$ задается скорость пластины-ударника, внешнее давление принимается постоянным (равным нулю).

Численное интегрирование системы уравнений (1)–(7) с указанными выше граничными и начальными условиями осуществляется с помощью разностной схемы сквозного счета второго порядка точности явного типа. Вопросы, связанные с корректностью численных решений, выбором соответствующей разностной схемы, анализом ее устойчивости, а также другие методические особенности изложены в [9]. На фиг. 1 приведена схематическая кривая нагрузки—разгрузки, которая была использована в расчетах (кривая OAB — ударная адиабата, E_1E — объемное сжатие и растяжение, кривая BC — упругая часть разгрузки, кривая CD — пластическая часть разгрузки в области сжатия и растяжения, σ_+ — предел текучести при растяжении, σ_* — предел прочности при растяжении, σ_- — предел текучести при сжатии, O_1O и O_2O — упругие части давления, O_1E_1 — искомая часть кривой растяжения $p = p(\xi)$ (шаровая часть тензора напряжений) в области пластических деформаций). Кривая O_1E_1 задается в виде

$$(11) \quad p = p_* [1 - \beta(1 - \xi/\xi_*)^n],$$

где $\xi = \rho/\rho_0 - 1 = -\varepsilon/(1+\varepsilon)$; $\xi_+ \leq \xi \leq \xi_*$. Параметры p_* , ξ_* , β , n определяются по 4 условиям: по значениям функций и их производных в точках O_1 и E_1 . В точке E_1 производная $dp/d\xi = 0$, а в точке O_1 производная $dp/d\xi$ совпадает с наклоном упругой части давления. Для определения параметров кривой II в случае однослойной мишени используются экспериментальные значения критической скорости удара и толщины отколовшегося слоя. В табл. 1 приведены рассчитанные значения коэффициентов кривой II для материалов АМГ-6 и оргстекла. Экспериментальная методика основана на известных методах торможения, отражения [11], искусственного откола и аналогична методике [2]. Двухслойная мишень состояла из двух пластин, изготовленных из различных материалов с известными ударными адиабатами, причем ударный импеданс второго слоя меньше первого. Соприкасающиеся поверхности первого и второго слоев

рости и толщины отколовшегося слоя использовались для построения кривой растяжения и определения предельных значений напряжений растяжения σ_* и предельных деформаций ε_* . Эксперименты и расчеты проводились для оргстекла ($\rho_0 = 1,18 \text{ г/см}^3$, $c = 2,68 \text{ км/с}$) и алюминиевого сплава АМГ-6 ($\rho_0 = 2,65 \text{ г/см}^3$, $c = 5,98 \text{ км/с}$). Образцы АМГ-6 изготовлены из прутка в состоянии поставки. Мишень и ударник выполнялись в форме дисков диаметром 50 мм, толщина первого слоя a мишени 0,5 см, второго слоя b — 0,1 см, толщина ударника c 0,35 см. На фиг. 2 приведена схема ударник — мишень, там же цифрами I—IV обозначены сечения мишени, для которых на фиг. 3 построены зависимости массовых скоростей от времени, полученные при численном расчете. Волнистыми линиями (см. фиг. 2) обозначены сечения, в которых возникали откольные разрушения.



Ф и г. 3

В табл. 2 приведены экспериментальные значения критических скоростей удара, откольные напряжения и деформации, рассчитанные по предложенной упругопластической модели, для сравнения приведены акустические оценки этих же величин. Как следует из табл. 2, результаты, полученные по упругопластической модели, существенно отличаются от акустического приближения.

Основной целью экспериментального и численного исследования по двухслойной мишени являлась проверка полученных кривых растяжения II при более сложном волновом процессе, включающем два откола. В этом случае ударник и первый слой мишени изготовлялись из АМГ-6, второй слой — из оргстекла. Расчетом и экспериментально определялись скорости соударения, при которых возникали откольные разрушения в сечениях A и B слоя a . Результаты расчетов и эксперимента (табл. 3) показаны

Т а б л и ц а 2

Материал	u , м/с	Упругопластическая модель		Акустическая модель	
		σ_* , кбар	ε_* , %	σ_* , кбар	ε_* , %
Оргстекло	90 ± 3	1,0	3,6	1,42	1,68
АМГ-6	230 ± 8	13,0	2,2	18,2	1,92

Т а б л и ц а 3

Материал	Эксперимент		Расчет	
	u_B , м/с	u_{AB} , м/с	u_B , м/с	u_{AB} , м/с
АМГ-6	230 ± 12	340 ± 15	225 ± 30	340 ± 40

ли, что с ростом скорости соударения откольное разрушение впервые возникает в сечении B при $u_B \leq u \leq u_{AB}$, при $u \geq u_{AB}$ реализуются два откола в сечениях A и B , причем в последнем случае откол в A наступает в более ранний момент времени, чем в B . Эта особенность находит качественное подтверждение при рассмотрении процесса соударения в $\sigma - u$ -диаграмме. Следует отметить, что скорость соударения u_B хорошо совпадает с критической скоростью для однослойной мишени, в которой откол возникает в сечении A . Сравнение результатов табл. 3 показывает достаточно хорошее согласие эксперимента и расчета.

Таким образом, результаты, полученные с помощью предложенного выше метода расчета динамических кривых растяжения материалов и проверенные специально проведенными экспериментами, могут быть использованы в качестве характеристик при решении задач с наличием откольных разрушений.

Поступила 23 VI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Златин Н. А., Поффе Б. С. О временной зависимости сопротивления отрыву при отколе.— ЖТФ, 1972, вып. 8.
2. Тарасов Б. А. О количественном описании откольных повреждений.— ПМТФ, 1973, № 6.
3. Ментешев Е. В., Ратников В. П., Рыбаков А. П., Ткаченко А. И., Шавков В. П. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину.— ФГВ, 1967, № 2.
4. Златин Н. А., Мочалов С. М., Пугачев Г. С., Брагов А. М. Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках.— ФТТ, 1974, вып. 6.
5. Никифоровский В. С., Сабитова С. И., Стреляев А. Е. К вопросу о разрушении твердых тел при динамическом нагружении.— ФТПРПИ, 1970, № 5.
6. Иванов А. Г. Откол в акустическом приближении.— ФГВ, 1975, № 3.
7. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений.— «Усп. физ. наук», 1965, т. 85, вып. 2.
8. Steverding B., Werkheiser A. «J. Mech. Engng Sci.», 1971, vol. 13, N 3.
9. Лобанов В. С. Движение некоторых сплошных сред при взрыве. Дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. МФТИ, 1972.
10. Wilkins M. L. In: Fundamental Methods in Hydrodynamics. Vol. 3. N. Y.— L., Acad. Press, 1964. Рус. пер. Расчет упругоэластических течений.— В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М., «Мир», 1967.
11. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.

УДК 534.211

РАСТЯГИВАЮЩИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МИШЕНИ ПРИ СОУДАРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

М. С. Качан, Ю. А. Тришин

(Новосибирск)

Введение. При взрыве в твердом теле в ударную волну переходит почти половина энергии взрывчатых веществ [1], поэтому ударно-волновые процессы играют большую роль при разрушении горных пород и ме-