

деформации. При этом флуктуационное поле будет представляться в виде интеграла по объему зерна:

$$\bar{E} = \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV,$$

где i, j принимают все значения, за исключением значения $\sigma_{33} \varepsilon_{33}$, которое определяет энергию среднего крупномасштабного поля, т. е. $\bar{E} = \int_V \sigma_{33} \varepsilon_{33} dV$. Решение поставленной задачи дает возможность вычислить

важный показатель рассеяния $\alpha = \bar{E}/E$ на отдельном зерне. Таким образом, построена численная процедура определения скоростей и показателей рассеяния продольных и поперечных волн в зернистых средах в зависимости от материала зерна и структуры порового пространства.

Поступила 14 VI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Mackenzie J. K. The elastic constant of a solid spherical holes.— Proc. Phys. Soc. Lond., 1950, ser. B, vol. 63.
2. Kuster G. T., Toksoz M. N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media. Pt I. Theoretical formulations.— Geophysics, 1974, vol. 39, N 5.
3. Hashin Z., Shtrikman S. A variational approach to the theory of elastic behavior of multiphase materials.— J. Mech. Phys. Solids, 1963, vol. 11.
4. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977.
5. Сибиряков Б. П. Способ расчета скоростей упругих волн в газонасыщенных периодических микроструктурах.— Геология и геофизика, 1981, № 5.
6. Максимов Л. А., Сибиряков Б. П., Татарников М. А. Теоретико-экспериментальные исследования распространения продольных и поперечных волн в двумерных пористых средах.— Геология и геофизика, 1981, № 11.
7. Партон В. З., Перлин П. И. Интегральные уравнения теории упругости. М.: Наука, 1977.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 1965.

УДК 532.593

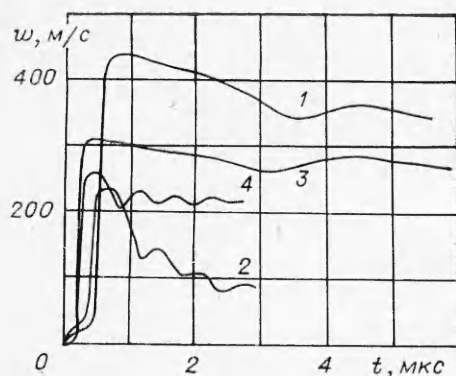
ИЗМЕРЕНИЕ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ЗА ПЛОСКОСТЬЮ ОТКОЛА

В. Д. Глузман, Г. И. Канель

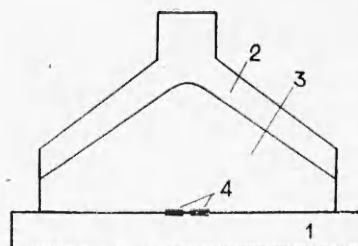
(Черноголовка)

Известно [1], что при отражении импульса сжатия от свободной поверхности в образце возникают растягивающие напряжения, которые могут приводить к его разрушению — отколу. Ввиду косвенного характера измерений откольной прочности материалов имеющиеся в литературе данные даже для близких условий нагружения могут различаться на порядок [2]. Регистрация скорости свободной поверхности образцов дает наиболее достоверную информацию о растягивающих напряжениях, действующих в плоскости откола и других сечениях откалывающейся пластины, но не дает сведений о дальнейшем развитии процесса по мере распространения отраженной волны разрежения за плоскость откола в глубь образца. Анализ явления в рамках континуально-кинетической модели разрушаемой среды [3] показывает, что релаксация напряжений в процессе разрушения ограничивает рост амплитудных значений растягивающих напряжений в отраженной волне разрежения. В данной работе предлагается способ и проведены измерения амплитудных значений растягивающих напряжений за плоскостью откола для меди М2 и нержавеющей стали Х18Н10Т.

Прямые измерения растягивающих напряжений в условиях одномерной динамической деформации, по-видимому, невозможны. Известно, однако, что при отражении волн сжатия или разрежения от контактной границы с веществом, обладающим меньшей динамической жесткостью, происходит изменение знака нагрузки [1]. Можно подобрать пару материалов различной сжимаемости таким образом, что после сжатия ударной волной при переходе отраженной волны разрежения из «жесткого»



Ф и г. 1



Ф и г. 2

в «мягкий» материал давление на контактной границе останется положительным, даже если в «жестком» материале оно достигало больших отрицательных значений, и может регистрироваться, например, с помощью манганиновых датчиков. Амплитудные значения растягивающих напряжений в «жестком» образце вблизи контактной границы могут быть затем получены из анализа волновых взаимодействий с использованием результатов регистрации профиля давления $p(t)$ на границе.

Для оценки закономерностей изменения растягивающих напряжений проведены две серии опытов с нержавеющей сталью и медью. В первой серии с использованием емкостных датчиков [4] проведена регистрация профилей скорости свободной поверхности образцов $w(t)$. Результаты регистрации приведены на фиг. 1, где кривые 1, 2 получены на образцах нержавеющей стали X18H10T толщиной 15 и 10 мм соответственно, а кривые 3, 4 — на образцах меди толщиной 12 мм. Волны сжатия малой длительности создавались в образцах ударом алюминиевой пластины толщиной 2 мм, разогнанной до скорости 450 ± 20 м/с, волны большой длительности генерировались плосковолновым генератором (взрывной линзой), находящимся в контакте с образцом. Амплитуда волны сжатия в последнем случае могла варьироваться.

Величина растягивающих напряжений в плоскости откола в первом приближении определялась по разнице Δw на первом максимуме $w(t)$ и первом минимуме [5]:

$$\sigma^* = (1/2)\rho_0 c_0 \Delta w,$$

где ρ_0 — плотность материала; c_0 — объемная скорость звука. Нержавеющая сталь имеет на профилях $w(t)$ явно выраженный упругий предвестник; для этого материала вводилась поправка δw [6], учитывающая нагон лидирующей частью откольного импульса, распространяющейся со скоростью продольной упругой волны c_l , разгрузочной части падающего импульса сжатия, имеющей скорость $\sim c_0$:

$$\sigma^{**} = (1/2)\rho_0 c_0 (\Delta w + \delta w),$$

где с учетом градиентов скорости в падающей волне разрежения \dot{w}_1 и во фронте откольного импульса \dot{w}_2 величина δw в данной работе определялась в виде

$$\delta w = \left(\frac{h}{c_0} - \frac{h}{c_l} \right) \frac{\dot{w}_1 \dot{w}_2}{\dot{w}_1 + \dot{w}_2}.$$

Здесь h — толщина откольной пластины, определяемая по периоду реверберации в ней откольного импульса. Результаты измерений суммированы в табл. 1. Полученные значения величин откольной прочности меди удовлетворительно согласуются с данными [6].

Эксперименты по определению растягивающих напряжений за плоскостью откола проводились в постановке, показанной на фиг. 2. Ударно-волновое нагружение образца 1 осуществлялось при подрыве плосковол-

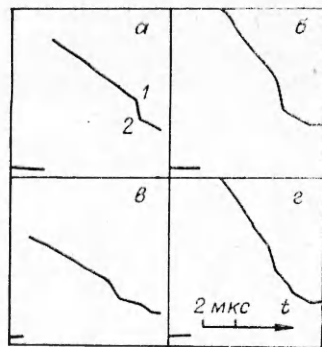
Таблица 1

Материал	Толщина образца, мм	Условия нагружения	Δw , М/с	h , мм	w_1 , 10^6 М/с ²	w_2 , 10^6 М/с ²	σ^* , ГПа	σ^{**} , ГПа
Медь М2	12	Взрывная линия	45+6	6	22	30	0,8±0,1	—
»	12	Ударник	62+4	1,1	290	165	1,1±0,1	—
Нержавеющая сталь Х18Н10Т	15	Взрывная линия	95+6	6,9	50+5	27+3	1,7±0,1	1,8±0,1
	10	Ударник	106+7	1,8	350+35	90+10	1,9±0,1	2,0±0,1

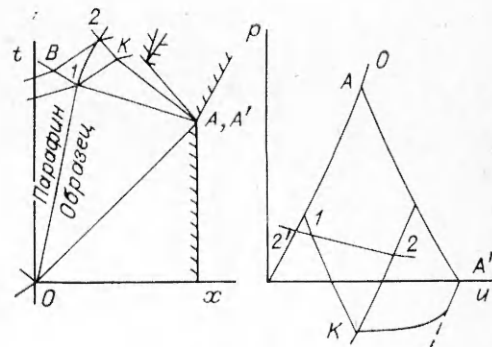
нового генератора диаметром 100 мм, состоящего из конического слоя ВВ 2 и парафинового вкладыша 3. На границе между парафином и образцом устанавливались манганиновые датчики давления 4, отделяемые от образца и парафина фторопластовыми прокладками по 0,2 мм с каждой стороны. Условия нагружения идентичны условиям получения профилей 1, 3 на фиг. 1. Толщина образцов составляла 12 мм. Осциллограммы опытов с медью и нержавеющей сталью приведены на фиг. 3, а, б. На осциллограммах фиксируются приход ударной волны на контактную границу, спад давления под действием распространяющейся вслед за ударным скачком волны разрежения и дополнительный резкий спад давления 1—2 с приходом на контактную границу волны разрежения, отраженной от свободной поверхности. Непосредственно из осциллограмм определялись величины давлений на ударном скачке и в точках 1, 2. При определении давлений учитывался гистерезис в показаниях манганиновых датчиков [7]. С учетом данных [7, 8] связь между давлением p и относительным изменением сопротивления $\Delta R/R_0$ для ударных волн с амплитудой 7—20 ГПа представлялась в виде

$$p = (\Delta R/R_0 - 0,0237)39,04 \text{ ГПа.}$$

Для повышения точности измерений основная часть опытов проведена с избыточным усилением регистрируемого сигнала (фиг. 3, б, з), так что в рабочей части экрана осциллографа с наилучшим разрешением фиксировалась отраженная волна разрежения. Способ определения давления в соответствующей точке 2 на профиле $p(t)$ хвостовой части волны разрежения в образце поясняется диаграммами время t — координата x и давление p — массовая скорость u на фиг. 4. Точки 1, 2 на фиг. 4 соответствуют обозначенным на экспериментальной осциллограмме. Линией $O12$ на $t-x$ диаграмме показана траектория контактной границы и расположенного на ней датчика давления. В точке O в образец вводится ударная волна с амплитудой p_0 , траекторией которой в образце показана линией OA . Известно, что при умеренных давлениях ударного сжатия изэнтропа раз-



Фиг. 3



Фиг. 4

Таблица 2

Материал	Толщина пластины, мм	p_0 , ГПа	p_1 , ГПа	p_2 , ГПа	p_2' , ГПа	p_K , ГПа	p_K' , ГПа
Медь М2	12	7,04	3,36	2,04	3,1	$-1,22 \pm 0,15$	—
»	4+8	7,04	3,36	2,17	3,1	$-0,66 \pm 0,15$	$-1,0 \pm 0,15$
Сталь Х18Н10Т	12	10,1	4,46	2,53	3,98	$-1,55 \pm 0,3$	—
	6+6	10,1	4,46	2,54	3,98	$-1,51 \pm 0,1$	—
	3+9	10,1	4,46	2,79	3,98	$-0,49 \pm 0,2$	$-1,0 \pm 0,1$

грузки металла в координатах $p - u$ с хорошей точностью совпадает с ударной адиабатой [1]. В этом случае одномерный импульс сжатия есть простая волна и изменение состояния на контактной границе до момента прихода отраженной волны разрежения описывается в координатах $p - u$ кривой OI , совпадающей с ударной адиабатой. После выхода ударной волны на свободную поверхность образца в нем появляется отраженная волна разрежения, описываемая на $t - x$ -диаграмме линиями $A1$ и $A2$. Начиная с момента t_1 — выхода фронта отраженной волны разрежения на контактную границу — изменение состояния $p - u$ на границе отклоняется от кривой OI и определяется пересечением траекторий изменения состояния вдоль соответствующих C_+ -характеристик падающей волны разрежения в парафине и C_- -характеристик отраженной волны разрежения в образце. Так, состояние в точке 2 определяется пересечением изэнтропы парафина $2'2$ и изэнтропы меди $K2$. Искомое давление в расположенной вблизи контактной поверхности точке образца K соответствует пересечению траекторий изменения состояния вдоль C_+ -характеристики $1K$ в образце и C_- -характеристики $K2$. Положение изэнтропы $1K$ на $p - u$ -диаграмме определяется по измеренному давлению p_1 . Из эксперимента также давление в точке 2, по величине которого можно найти положение изэнтропы $K2$, если известна траектория изменения состояния $2'2$ парафина вдоль C_+ характеристики $B2$. Положение последней определяется по величине давления в точке 2', определяемого из экспериментальных профилей $p(t)$ экстраполяцией его начального участка на момент времени t_2 .

Учет упругопластических свойств материала приводит к смещению рассматриваемых траекторий на $p - u$ -диаграмме, но в связи с тем, что все состояния вещества соответствуют области пластического деформирования, такой учет практически не влияет на точность определения давления в точке K .

В табл. 2 приведены значения давлений в точках O , 1 , 2 , $2'$, полученные по результатам 4-х измерений, и рассчитанные по этим данным амплитудные значения растягивающих напряжений p_K . В расчетах использовалась ударная адиабата меди в виде $\bar{D} = 3,95 + 1,45u$ (км/с) и парафина в виде $D = 2,96 + 1,53u$ (км/с) [9]. При определении величин p_2 вводилась незначительная поправка, учитывающая уменьшение скорости звука вдоль характеристики $B2$ с уменьшением давления.

Определение описанным способом величины растягивающих напряжений p_K подвержено влиянию ряда источников погрешностей, таких как возможные отклонения процесса от одномерного, несовпадения ударных адиабат и изэнтроп разгрузки материалов и отклонения гистерезиса показаний манганиновых датчиков от средней величины $\delta R/R_0 = 0,0237$. Для оценки общей погрешности измерений проведены дополнительные опыты с заранее разрезанными образцами меди и нержавеющей стали. В этих опытах образцы с общей толщиной 12 мм составлялись из двух пластин и с учетом того, что в плоскости разреза отрицательное давление невозможно, давление в точке K может быть оценено по зарегистрированному профилю давления на участке OI . В частности, если в обращенной

к парафину тонкой пластине разрушений нет, то давление в точке K определяется как

$$p'_K = p_{cp} [2h/c_0 - (t_2 - t_1)].$$

Осциллограммы опытов с составными медными и стальными образцами приведены на фиг 3, *в*, *г* соответственно, а результаты измерений — в табл. 2. Из сравнения величин p_K и p'_K видно, что найденные амплитудные значения растягивающих напряжений могут быть занижены на 0,3—0,4 ГПа для меди и 0,4—0,6 ГПа для стали. Таким образом, на расстоянии 4—5 мм за плоскостью откола амплитудные значения растягивающих напряжений составляют 1,2—1,6 ГПа для меди и 1,5—2,1 ГПа для нержавеющей стали. Из сравнения этих данных с результатами измерений откольной прочности по профилям $w(t)$ видно, что в меди возможен некоторый рост максимальных растягивающих напряжений по мере распространения отраженной волны разрежения за плоскостью откола, а в нержавеющей стали максимальные значения растягивающих напряжений практически ограничены величиной откольной прочности. Этот вывод для нержавеющей стали подтверждается сравнением приведенных в табл. 2 результатов опытов со сплошными образцами и с образцами, составленными из шести-миллиметровых пластин. Наблюдаемое различие в характере изменения растягивающих напряжений за плоскостью откола коррелирует с приведенными в табл. 1 результатами определения зависимости реализуемой при отколе прочности от характерной длительности исходной нагрузки.

Результаты измерений растягивающих напряжений за плоскостью откола могут быть использованы при построении кинетических моделей разрушения. Опыты с нержавеющей сталью показывают, в частности, что, несмотря на затянутость конечной стадии разрушения, начальная скорость процесса в этом случае достаточно велика.

В заключение авторы благодарят В. Е. Фортова за дискуссии и Г. А. Савельеву за помощь в подготовке и проведении измерений.

Поступила 15 VI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. Канель Г. И. Сопротивление металлов откольному разрушению. — ФГВ, 1982, № 3.
3. Канель Г. И., Черных Л. Г. О процессе откольного разрушения. — ПМТФ, 1980, № 6.
4. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности. — ПТЭ, 1963, № 1.
5. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении. — ФММ, 1964, т. 25, № 4.
6. Романченко В. И., Степанов Г. В. Зависимость критических напряжений от временных параметров нагрузки при отколе в меди, алюминии и стали. — ПМТФ, 1980, № 4.
7. Канель Г. И., Вахитова Г. Г., Дремин А. Н. Метрологические характеристики мanganовых датчиков давления в условиях ударного сжатия и разгрузки. — ФГВ, 1978, № 2.
8. Ананьин А. В., Дремин А. Н., Канель Г. И. Поллиморфное превращение железа в ударной волне. — ФГВ, 1981, № 3.
9. Мак-Куин Р., Марш С. и др. Уравнения состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн. — В кн.: Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973.