

ющая регистрируемому электрическому сигналу с индуктивного датчика. Из сопоставления кривых $w(t)$ и $i(t)$ видно, что характер записи регистрируемого электрического сигнала с трансформатора тока $i(t)$ близок по форме к волне ускорения $w(t)$.

Проведенные эксперименты показывают, что электронно-инерционный эффект при ударном нагружении может быть использован для неконтактных измерений деформаций при высокоскоростных испытаниях материалов.

Поступила 6 IV 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., «Наука», 1966.
2. Цидильковский И. М. Электроны и дырки в поле сил инерции.— «Усп. физ. наук», 1975, т. 115, вып. 3.
3. Parmenter R. H. The acousto-electric effect.— «Phys. Rev.», 1953, vol. 89, N 5.
4. Стихановский Б. Н. О возникновении электрического тока при ударе по металлическим и полупроводниковым телам.— «Изв. СО АН СССР», 1973, № 8, вып. 3.
5. Большаков А. П., Новиков С. А. и др. О получении диаграмм растяжения образцов при взрывном нагружении.— ПМТФ, 1975, № 1, с. 184.

УДК 539.58

О ВЛИЯНИИ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СДВИГА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОТКОЛОВ

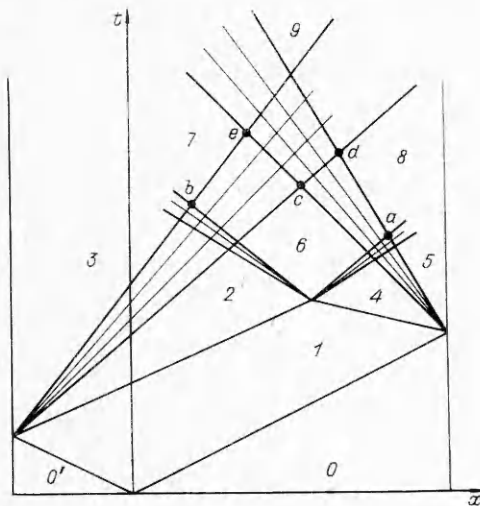
С. А. Новиков, А. В. Чернов

(Москва)

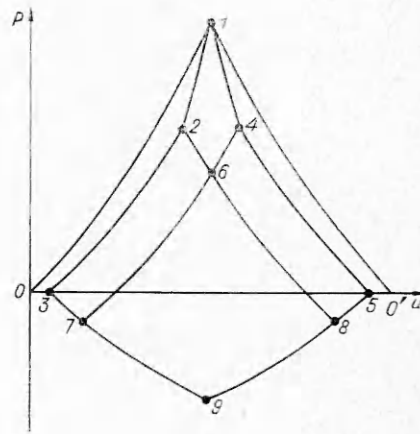
При расчетах взаимодействия волн разрежения, приводящего к разрушению материала (отколу), обычно используют гидродинамическое уравнение состояния. Такие расчеты необходимы, например, при определении величины откольных напряжений расчетно-экспериментальным методом по толщине образующегося тыльного откола в образце.

В то же время из экспериментальных работ [1—3] следует, что в области давлений до ≈ 1 Мбар поведение многих металлов значительно отличается от гидродинамического: критические напряжения сдвига за фронтом ударной волны сжатия, определяющие амплитуду упругой волны разгрузки, могут существенно сказываться на характере образующегося течения (например, так называемое «негидродинамическое» затухание ударных волн). Величина критического напряжения сдвига σ_* для металлов зависит от давления в ударной волне и достигает значений ~ 100 кбар. Поэтому интересно рассмотреть образование отколов с учетом влияния напряжений сдвига за фронтом ударной волны.

Рассмотрим простейший случай образования откола при ударе пластиной-ударником по образцу (ударник и образец изготовлены из одного материала). Схема взаимодействия волн разгрузки представлена на фиг. 1 в координатах $x - t$ (путь — время) и фиг. 2 в координатах $p - u$ (давление — массовая скорость). Обозначенные на фиг. 2 цифрами точки (в $p - u$ координатах) определяют состояние вещества в областях течения на плоскости $x - t$ (фиг. 1), имеющих те же цифровые обозначения.



Фиг. 1



Фиг. 2

При отражении ударных волн сжатия от свободных поверхностей ударника и образца разгрузка вещества из состояния 1 происходит сначала в упругих 1—2 и 1—4, а затем в пластических 2—3 и 4—5 волнах разрежения (обозначение 1—2 отвечает волне, переводящей материал из состояния 1 в состояние 2 (см. фиг. 2), соответствующее областям 1 и 2 (см. фиг. 1) и т. д.).

В случае, когда упругая волна разгрузки 1—2 со стороны ударника не догоняет волну сжатия в образце, при пересечении упругих волн 1—2 и 1—4 материал разгружается в пластических волнах 2—6 и 4—6 до некоторого давления, характеризуемого точкой 6 (см. фиг. 2). Затем при взаимодействии пластических волн 2—6, 2—3 и 4—6, 4—5 реализуются две области 7 и 8 с отрицательным давлением, определяемым амплитудой упругой волны разгрузки, т. е. значением критических сдвиговых напряжений. После этого при взаимодействии волн 6—7 и 6—8 возникает область максимальных отрицательных напряжений, в которой, как обычно считается, и происходит разрушение вещества.

Таким образом, до начала действия максимальных растягивающих напряжений, определяемых амплитудой ударной волны сжатия, в двух сечениях образца в течение некоторого времени действуют растягивающие напряжения, величина которых определяется значением критических сдвиговых напряжений при данном давлении в ударной волне сжатия, т. е. может быть достаточно большой. Характерное время действия растягивающих напряжений в областях 7 и 8 (см. фиг. 1) можно оценить по расстоянию от точки *a* до первой характеристики, выходящей из точки *d* ($\Delta t = 2(t_d - t_a)$).

Оценим параметры импульса растяжения в этих сечениях образца для меди и алюминия, используя известные данные об уравнении состояния этих металлов [4] и зависимости критических сдвиговых напряжений от давления на фронте ударной волны [2].

Считаем, что на ударной адиабате

$$p_n = p + (2/3)\sigma_*,$$

где p_n — давление ударного сжатия, нормальное к фронту ударной волны; p — гидродинамическое давление. Критическое напряжение сдвига по

определению равно

$$\sigma_* = |p_n - p_\tau|,$$

где p_τ — давление, параллельное фронту ударной волны. Значение σ_* обычно вычисляется в предположении постоянства коэффициента Пуассона ν . Если предположить, что значение σ_* при сжатии равно σ_* при растяжении, то для случая распространения ударной волны имеем

$$\sigma_* = (p_*/2)[(1-2\nu)/(1-\nu)],$$

где p_* — амплитуда упругой волны разгрузки.

Фиг. 3 иллюстрирует расположение ударной адиабаты *I*, кривой гидродинамического сжатия *II* и кривой пластической разгрузки *III*. Переход из состояния 1 в состояние 2 осуществляется по кривой упругой разгрузки.

На кривой пластической разгрузки выполняется соотношение

$$p_- = p - (2/3)\sigma_*.$$

Зная значения σ_* , соответствующие давлению ударного сжатия p_n , можно построить кривую пластической разгрузки p_- .

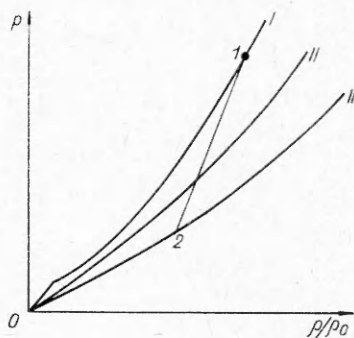
В данной работе кривая p_- , построенная по экспериментальным данным, аппроксимировалась в области положительных напряжений функцией вида $p_- = [A_0 + A_1(\delta - 1)](\delta - 1)$, в области отрицательных напряжений $p_- = A_0(\delta - 1)$, где $\delta = \rho/\rho_0$ — сжатие.

Для решения задачи об ударе пластиной-ударником по образцу к уравнениям движения сплошной среды, написанным в лагранжевых координатах, применялся метод характеристик.

Основные результаты расчетов приведены в табл. 1, 2, где p — давление в ударной волне сжатия; Δp — давление в областях 7 и 8 на фиг. 1; p_a — давление в области 6 на фиг. 1; p_{\max} — максимальное растягивающее напряжение (давление везде в килобарах); h — толщина образца, отнесенная к толщине пластины-ударника; t, x — координаты точек, обозначенных буквами на фиг. 1 (буквенные индексы при них соответствуют обозначениям на фиг. 1; если толщина пластины-ударника 1 мм, то x измеряется в миллиметрах, а t в микросекундах; для других толщин пластины-ударника пространственная координата и время изменяются пропорционально); Δt_1 — характерное время действия растягивающих напряжений в области 8 вблизи свободной поверхности образца; Δt_2 — характерное время действия растягивающих напряжений в области 7.

В табл. 1 представлены результаты расчетов для алюминия, в табл. 2 — для меди; видно, что возникающие до действия максимальных растягивающих напряжений отрицательные напряжения в областях 7 и 8 сравнимы по величине с откольной прочностью материала [2].

Одной из особенностей рассматриваемых течений является то, что характерное время действия отрицательных напряжений в области, находящейся внутри образующего тыльного откола, заметно больше, чем время действия равного по величине растягивающего напряжения в остающейся части образца (вблизи поверхности удара). Так как величина этих напряжений порядка величины откольной прочности металла при этих условиях нагружения, то в соответствии с существующими представлениями о



Ф и г. 3

Т а б л и ц а 1

h	t_a	x_a	t_b	x_b	t_c	x_c	t_d	x_d	t_e	x_e	Δt_1	Δt_2
$p = 100 \Delta p = -15,7 p_a = 45,6 p_{\max} = -66,7$												
2	0,452	1,450	0,528	0,623	0,484	1,032	0,514	1,179	0,549	0,715	0,124	0,042
4	0,702	3,798	0,931	2,421	0,807	3,096	0,834	3,227	0,939	2,455	0,264	0,014
$p = 200 \Delta p = -21,3 p_a = 112 p_{\max} = -113,5$												
2	0,405	1,509	0,491	0,532	0,414	1,090	0,453	1,304	0,506	0,598	0,096	0,030
3	0,512	2,692	0,683	1,390	0,552	2,180	0,587	2,372	0,693	1,431	0,150	0,020
4	0,619	3,875	0,875	2,247	0,690	3,270	0,720	3,440	0,879	2,264	0,202	0,008
$p = 300 \Delta p = -24 p_a = 185 p_{\max} = -149$												
2	0,372	1,552	0,464	0,465	0,370	1,129	0,413	1,379	0,476	0,518	0,082	0,024
3	0,466	2,742	0,649	1,293	0,492	2,257	0,529	2,471	0,656	1,323	0,126	0,014
$p = 400 \Delta p = -26 p_a = 262 p_{\max} = -178$												
2	0,344	1,596	0,442	0,411	0,338	1,157	0,383	1,432	0,453	0,458	0,077	0,022
3	0,427	2,797	0,622	1,218	0,451	2,314	0,487	2,540	0,627	1,241	0,120	0,010

зависимости разрушающих напряжений от времени их действия следует ожидать в обеих областях некоторого дробления металла (появление микротрещин, не образующих поверхности разрушения). Причем степень дробленности (количество микротрещин на единицу поверхности) в отколовшейся части образца должна быть больше, чем в оставшейся.

Проведены эксперименты, в которых медный образец диаметром 90 мм и толщиной 10 мм нагружался ударом медной 2,5 мм пластины, разогнанной до скорости 500 м/с. Давление на фронте ударной волны при этом равно 100 кбар. В опытах зафиксирован тыльный откол. На микрофотографиях разреза образцов на некотором расстоянии от поверхности удара,

Т а б л и ц а 2

h	t_a	x_a	t_b	x_b	t_c	x_c	t_d	x_d	t_e	x_e	Δt_1	Δt_2
$p = 100 \Delta p = -27 p_a = 22 p_{\max} = -74$												
2	0,664	1,316	0,736	0,708	0,713	0,986	0,738	1,071	0,766	0,805	0,148	0,060
4	1,058	3,541	1,275	2,528	1,188	2,957	1,211	3,037	1,295	2,594	0,306	0,040
6	1,452	5,768	1,813	4,347	1,664	4,929	1,685	5,002	1,824	4,382	0,466	0,022
$p = 200 \Delta p = -39 p_a = 70 p_{\max} = -132$												
2	0,610	1,386	0,698	0,635	0,634	1,029	0,674	1,176	0,722	0,714	0,128	0,048
5	1,132	4,793	1,483	3,290	1,268	4,118	1,301	4,241	1,491	3,317	0,238	0,016
$p = 300 \Delta p = -43 p_a = 138 p_{\max} = -200$												
2	0,566	1,449	0,666	0,573	0,576	1,065	0,626	1,255	0,687	0,642	0,120	0,042
4	0,876	3,762	1,178	2,304	0,961	3,195	1,001	3,355	1,187	2,333	0,250	0,018

т. е. примерно в области 7 (см. фиг. 1), обнаружена серия отдельных микротрещин, что может указать на факт существования кратковременных отрицательных напряжений в этом сечении. Сетка микротрещин по толщине образовавшегося тыльного откола значительно гуще, что также соответствует результатам анализа течений.

Поступила 10 II 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Curran D. R. Nonhydrodynamic attenuation of shock waves in aluminum.— «J. Appl. Phys.», 1963, vol. 34, N 9.
2. Новиков С. А., Синицына Л. М. О влиянии давления ударного сжатия на величину критических напряжений сдвига в металлах.— ПМТФ, 1970, № 6, с. 107.
3. Альтшулер Л. В., Бражник М. И., Телегин Г. С. Прочность и упругость железа и меди при высоких давлениях ударного сжатия.— ПМТФ, 1971, № 6.
4. Альтшулер Л. В., Корнер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений.— ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 3.

УДК 539.375

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВОЗЛЕ ТРЕЩИН, ИСХОДЯЩИХ ИЗ КОНТУРОВ ОТВЕРСТИЙ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЛАСТИНЫ

В. М. Мирсалимов

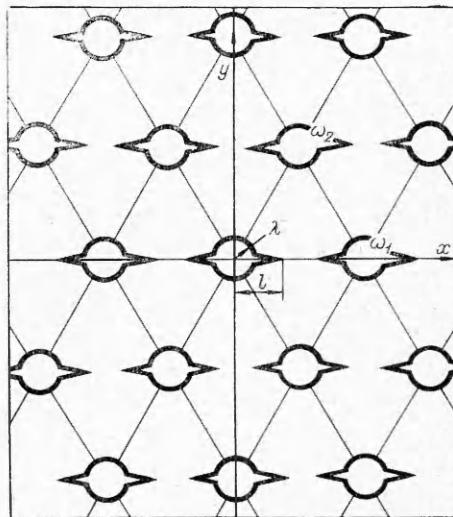
(Лунецк)

В последние годы появилось значительное число работ (см. обзоры [1, 2]), в которых изучалось предельное напряженное состояние возле трещин, исходящих из контура одиночного отверстия. Аналогичной задаче о растяжении пластины с одиночным отверстием посвящена работа [3].

1. Пусть имеется двоякопериодическая решетка с круговыми отверстиями, имеющими радиус λ ($\lambda < 1$) и центры в точках

$$P_{mn} = m\omega_1 + n\omega_2 \quad (m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad \omega_1 = 2, \quad \omega_2 = 2le^{i\alpha}, \quad l > 0, \quad \text{Im} \omega_2 > 0.$$

Из контуров отверстий исходят симметричные прямолинейные щели (фиг. 1). Контур круговых отверстий и берега разрезов свободны от нагрузок. Рассмотрим задачу о растяжении такой перфорированной пластины постоянными усилиями $\sigma_2 = \sigma_y^\infty$ в направлении, перпендикулярном линии разрезов. В силу симметрии граничных условий и геометрии области D , занятой материалом пла-



Фиг. 1