

СИММЕТРИЯ И ОТКОЛЬНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ

М. А. Лебедев, Б. В. Литвинов

ВНИИ технической физики,
454070 Снежинск

Исследована роль симметрии взаимодействия ударных волн со свободными и подпертыми поверхностями в формировании откольных разрушений. Проведен качественный анализ схем двух предельных случаев развития процесса разгрузки в сжатой ударной волной пластине. Результаты анализа сравниваются с экспериментами авторов и других исследователей. Полученные данные свидетельствуют, что процессом откольных разрушений можно управлять, изменяя симметрию нагружения.

Откольные явления изучаются давно и им посвящено много работ, обзор которых дан в [1]. Однако некоторые новые аспекты требуют дополнительных исследований. К таковым относится роль симметрии [2, 3] взаимодействия ударных волн (УВ) со свободными или подпертыми поверхностями, что позволяет нагружать материалы волнами разгрузки (ВР) разных интенсивностей и направления. Именно описанию таких исследований посвящена эта статья.

В первой серии опытов, постановка которых показана на рис. 1, образцы нагружали взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ), инициируемого электродетонаторами в четырех точках торца в направлении к пластине с неодновременностью выхода детонационной волны (ДВ) на торец тела, равной $\sim 0,4$ мкс. Чтобы ослабить и задержать по времени боковые разгрузки УВ, стальное тело (нагружаемый образец) размещалось в массивном стальном стволе и своими краями опиралось на плиту, что позволяло имитировать его заземление в стволе для создания экстремальных условий появления поверхностей разрушения путем искусственного увеличения инерционности этого тела. В ряде опытов в теле делали борозды (см. рис. 1, б) различной глубины,

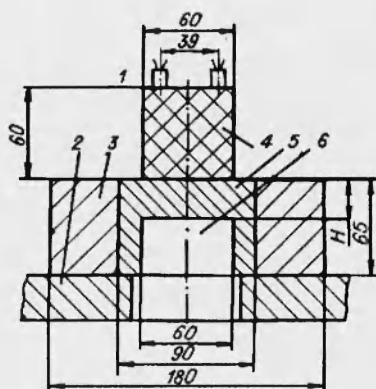


Рис. 1. Схема постановки опытов:
1 — электродетонаторы; 2 — опорная стальная плита; 3 — ствол из Ст.3; 4 — заряд ТГ 40/60 с плотностью $\rho = 1,68 \cdot 10^3$ кг/м³; 5 — нагружаемый образец из Ст. 3; 6 — полость, заполняемая средой с $(\rho c)_{\text{ср}} < (\rho c)_{\text{Ст}}$.

что позволяло изменять толщину H нагружаемой пластины, а также, заполняя это углубление средой с различной акустической жесткостью (воздух, вода, алюминий), изменять величину отраженного от контактной границы пластины — среда импульса растяжения. Последний определяет, согласно [4], величину растягивающего напряжения σ_r в сравнении с напряжением σ_1 в падающей волне сжатия при ее переходе из среды с жесткостью $\rho_1 c_1$ в более сжимаемую с жесткостью $\rho_2 c_2$:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_1} = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (1)$$

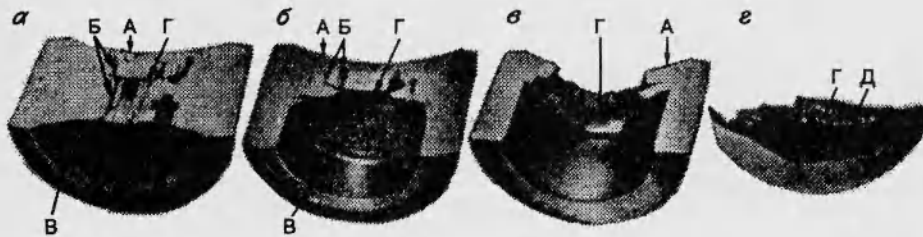


Рис. 2. Осевые разрезы образца после нагружения. В полости б на рис. 1 воздух (б), алюминий (в) или вода (г).

Н, мм: а — 65, б — 40, в, г — 20.

На рис. 2 приведены характерные снимки осевого сечения сохраненных после их нагружения стальных образцов. Здесь можно наблюдать ряд видов разрушения, общий обзор характера которых дан в работе [5, фиг. 46]:

кратер А на торце со стороны заряда (рис. 2, а-в);

обширная область разрушения Б, распространяющаяся вдоль оси образца. Эти разрушения лучше видны на рис. 2, а и являются результатом схождения к оси и усиления при этом квазицилиндрической ВР, возникающей на внешней цилиндрической поверхности ствола;

шероховатый откол В (может быть множественным) хорошо известен как откол Гопкинсона. Это разрушение происходит при взаимодействии падающей на торец волны сжатия и порождаемой ее разгрузкой на этом торце волны растяжения (см. рис. 2, а, б);

относительно плоская, параллельная торцам, с относительно гладкой поверхностью трещина Г (см. рис. 2, а-в). При определенных условиях она переходит в гладкий откол (рис. 2, г) вследствие фазового превращения в стали при давлениях $p > 13$ ГПа и является результатом встречи ВР, исходящих с противоположных торцов пластины;

конический кольцевой откол Д происходит при взаимодействии двух ВР, исходящих от свободной торцевой и боковой поверхностей пластины, последняя из которых в случае рис. 2, г выродилась в кольцевую линию, образующую пересечение дна и боковой поверхности углубления б (см. рис. 1). Поверхность Д — это также и поверхность отрыва от образца, прогибающегося за счет избыточной кинетической энергии откола с уже сформировавшейся поверхностью Г при его инерционном движении.

Во всех опытах нагружаемый образец подвергся разрушению разной степени. Из сравнения образцов на рис. 2, в и г видно, что увеличение разницы между акустическими жесткостями образца и среды, а соответственно и изменение отношения (1), приводит в опыте рис. 2, г к более четкому образованию и отлету от образца откола вида Г.

Кратер А в большинстве случаев устраняется введением между ВВ и пластиной демпферной прокладки или воздушного зазора. Эта же прокладка позволяет при определенных толщинах пластины устранить откол вида В, так как введение демпферной прокладки или воздушного зазора, т. е. среды с $\rho c \ll (\rho c)_{\text{пл}}$, снижает давление на фронте УВ и растягивает импульс.

Область разрушения Б может быть устранена использованием ствола, который не только сдерживает радиальные деформации пластины, но и, будучи своего рода искусственным отколом (физической неоднородностью по прочности) в радиальном направлении, разгружает пластину от импульса поперечных ВР.

Т а б л и ц а 1

H , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_2/d_1	δ , мм	δ/d_1	Среда в полости	σ_r/σ_1	Характер разрушения (см. рис. 2)
65	60	17	0,28	37	0,62	Воздух	1	а
40	60	24	0,60	21	0,35	»	1	б
20	60	54	0,90	6,5	0,11	Алюминий	0,46	в
20	60	45	0,75	9,0	0,16	Вода	0,94	г

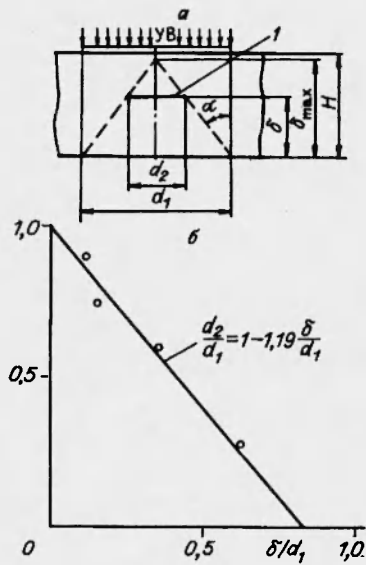


Рис. 3. Схема процесса разгрузки волны растяжения (а) и зависимость между диаметром и толщиной откола (б) вида Г (1 — поверхность откола вида Г.)

Наиболее трудно устранимы поверхности откола вида Г и Д. Так, в описанной выше серии опытов в первом приближении можно считать, что диаметр нагружаемого образца (пластина вместе со стволом) настолько велик, что боковая разгрузка не догоняет плоскую часть фронта УВ до ее выхода на свободную поверхность. Поэтому с целью качественного анализа закономерности образования поверхности разрушения вида Г рассмотрим приведенную на рис. 3,а схему этого предельного случая, в котором боковой разгрузке начинает подвергаться только фронт волны растяжения с момента ее возникновения на свободной поверхности пластины, потому ее начальный диаметр d_1 равен диаметру исходной УВ.

Из рассматриваемой схемы для вызываемого встречей двух торцевых ВР плоского откола вида Г толщиной δ и диаметром d_2 получается соотношение

$$\frac{d_2}{d_1} = 1 - 2 \frac{\delta}{d_1} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

из которого видно, что максимальная толщина откола при $d_2 = 0$

$$\delta_{\max} = d_1 / (2 \operatorname{tg} \alpha) \quad (3)$$

и, естественно, не может превышать толщину пластины H .

Поэтому не удивительно, что другие исследователи при взрывном нагружении пластины с толщиной $H \gg d_1 / (2 \operatorname{tg} \alpha)$ зарядом ВВ относительно малого диаметра d_1 не наблюдали откол этого вида, поскольку он вырождался в точку.

Угол боковой разгрузки α можно оценить из зависимости [6]

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{c^2}{D^2} - \left(1 - \frac{u}{D}\right)^2},$$

где c , D и u — скорость звука, волновая и массовая скорости за фронтом УВ.

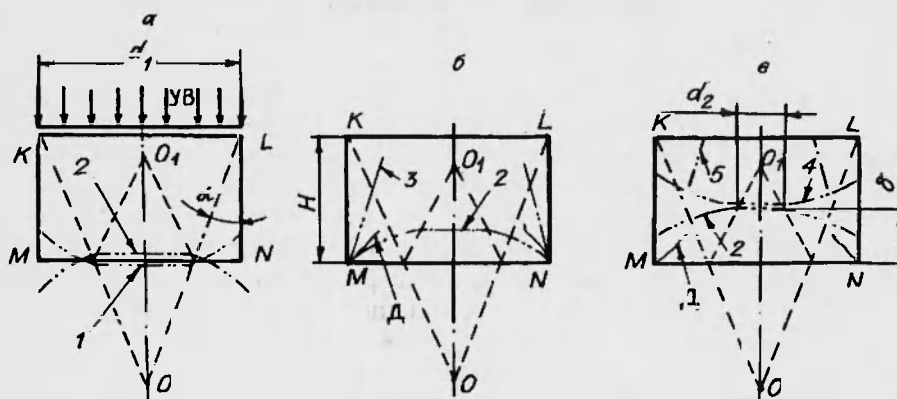


Рис. 4. Схема развития процесса разгрузки в пластине $KLMN$:
 а — момент выхода $УВ$ 1 на торец MN и зарождения $ВР$ 2; б — момент встречи волн 2 и 3 в угловых точках торца MN ; в — момент встречи торцевых волн 2 и 4.

Так, в описанных выше опытах, результаты которых в обозначениях рис. 3,а сведены в табл. 1, при нагружении стали нормально падающей ДВ заряда из ТГ 40/60 с $\rho = 1,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ боковая разгрузка охватывает угол $\alpha \approx 29^\circ$. На рис. 3,б линией изображена зависимость (2), а из табл. 1 нанесены экспериментальные данные. Видно, что расчет, несмотря на весьма упрощенную схему, лежащую в его основе, вполне удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

При разгоне пластины возможен и другой предельный случай, когда фронт $УВ$ уже с момента ее возникновения подвергается боковой разгрузке. На схеме рис. 4 показаны наиболее характерные моменты этого процесса. Первым рассматривается момент выхода на свободную поверхность MN пластины $УВ$ 1. Почти сразу же от свободной поверхности в пластину пойдет $ВР$ 2, растягивая пластину. Величины плоской части $УВ$, выходящей на свободную поверхность пластины, и $ВР$, входящей в пластину, зависят от относительной толщины пластины H/d_1 . Плоская часть $ВР$ также подвергается боковой разгрузке и, как можно положить в акустическом приближении, полностью исчезает в точке O_1 , симметричной точке O относительно торца MN .

Вторым характерным временем (рис. 4,б) можно считать момент выхода $УВ$ 1 в угловые точки торца MN . В этот момент в этих точках возникает фронт конической $ВР$ 3 и начинается ее взаимодействие с волной растяжения 2, что и приводит к образованию конической поверхности разрушения $Д$, исходящей из угловых точек торца MN .

Коническая поверхность разрушения $Д$ получена в опыте (рис. 5), где стальная пластина толщиной 5 мм располагалась на алюминиевой подложке толщиной 45 мм и нагружалась зарядом ТГ 40/60 высотой 60 мм. Заряд ставили непосредственно на стальную пластину и инициировали с противоположного торца четырьмя электродетонаторами, равномерно расположенными по диаметру, равному 39 мм. Диаметры пластины, подложки и заряда равны 60 мм. На рис. 5 видно, что поверхность разрушения $Д$ сильно оплавлена. Такое оплавление

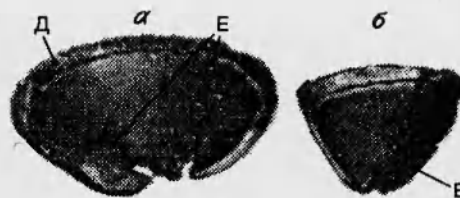


Рис. 5. Вид располагавшейся на подложке из алюминия пластины из Ст.3 (а) с поперечным вырезом (б) ее 1/4 части.

ние характерно только для тонкой пластины, находящейся в контакте с зарядом. На этой же пластине в местах встречи ДВ от детонаторов видны сходящиеся в центре и вызывающие в этой области частичное дробление пластины четыре радиальные сдвиговые трещины Е с углом $\sim 45^\circ$ к плоскости пластины и с цветами побежалости. Наличие последних и оплавление свидетельствуют о весьма интенсивном нагружении пластины.

Анализируя рис. 4, нужно отметить момент встречи волн растяжения 2 и 4. Волна 4 исходит с торца KL (см. рис. 4, в), который также подвергался боковой разгрузке. Последняя ВР имеет несколько иную и более сложную геометрию, так как процесс разгрузки сбоку и со стороны торца KL из-за наличия упруго растекающегося в радиальном направлении поршня из продуктов взрыва (ПВ) имеет свою специфику и должен проходить с задержкой. В месте встречи волн 2 и 4, между точкой O_1 и торцом MN реализуется плоская зона разрушения диаметром не более d_2 .

При больших толщинах пластины волны встречаются между точкой O_1 и торцом KL , в результате образуется сферическая поверхность с выпуклостью в сторону торца MN , которая переходит в коническую поверхность разрушения в результате взаимодействия торцевой ВР 4 с боковой конической 5. В итоге образуется так называемый «полный сердечник», впервые экспериментально обнаруженный в [7].

Процесс по схеме рис. 4 принципиально отличается от процесса по схеме рис. 3: ВР, порождая радиальные и в случае цилиндра тангенциальные напряжения, в сочетании с торцевыми ВР переводят квазиоднородное (без учета поперечных волн сжатия) сжатие в УВ в объемное растяжение. В итоге появляется новое образование: конические поверхности разрушения вида Д. С точки зрения понятий симметрии в изучаемом явлении имеет место преобразование симметрии: квазиплоская УВ, созданная детонационной волной, которую инициировали четырьмя детонаторами, вызвала конический откол. Это могло произойти только в результате взаимодействия ВР, идущих от торцов и от боковой поверхности пластины. Такое сложное явление

обусловлено первоначальной гетерогенностью использованного взрывного устройства, в котором метаемое тело (пластина) контактирует с гораздо менее жесткой средой. Повышая прочность пластины или жесткость среды, можно влиять на образование поверхностей разрушения, что и наблюдали в [8].

Из рассмотренной на рис. 4 схемы для плоского откола вида Г толщиной δ и диаметром d_2 получается соотношение

$$\frac{d_2}{d_1} = 1 - 2 \frac{H + \delta}{a_1} \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

из которого следует, что предельная толщина откола при $d_2 = 0$

$$\delta_{\max} = \frac{d_1}{2 \operatorname{tg} \alpha} - H, \quad (5)$$

что на толщину пластины H меньше, чем по зависимости (3). Из зависимости (5) также видно, что плоский откол вида Г диаметром $d_2 > 0$

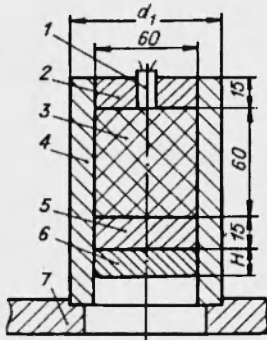


Рис. 6. Схема постановки опытов:

- 1 — электродетонатор; 2 — стальная накладка; 3 — заряд ТГ 40/60 с $\rho = 1,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; 4 — ствол из Ст.3; 5 — прокладка из магния; 6 — метаемое тело из Ст.3; 7 — опорная стальная плита.

может быть при относительной толщине пластины

$$H/d_1 < 1/(2 \operatorname{tg} \alpha).$$

Учитывая, что при разгоне тел можно использовать ствол, который одновременно и корпус для заряда ВВ, в дополнение к опыту рис. 5 проведены два опыта, постановка и результаты которых приведены на рис. 6, 7 и в табл. 2. Заряд инициировался одним соосно расположенным электродетонатором с неодновременностью выхода ДВ на торец тела b , равной ~ 1 мкс. В табл. 2 также приведены результаты работы [8], полученные при нагружении стальных пластин без ствола зарядом ТГ 50/50, генерирующим плоскую УВ.

Т а б л и ц а 2

Номер опыта	Δ , мм	H , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	δ , мм	d_2/d_1	$\frac{H + \delta}{d_1}$	Характер разрушения
1	0	5	60	52	5	0,87	0,08	рис. 5
2	5	20	70	39	12	0,58	0,46	рис. 7, а
3	30	15	120	>60	15	>0,5	0,25	рис. 7, б
4	0	40	120	84	19	0,7	0,49	[8], табл. 2
5	0	50	120	64	20,5	0,53	0,59	
6	0	65	120	34	21,5	0,28	0,72	
7	0	74	120	31	22	0,26	0,80	
8	0	80	120	0	23,4	0	0,86	

Примечание. В случае наличия ствола ($\Delta \neq 0$) за d_1 принимается наружный диаметр ствола; значение δ в опыте 8 определено расчетом, исходя из того, что на основании анализа экспериментальных данных [8] высота пластины после нагружения составляет 0,83 от первоначальной.

Приведенный на рис. 7, а откол от пластины имеет толщину $\delta = 12$ мм, гладкую откольную поверхность вида Г с $d_2 = 39$ мм и шероховатую коническую поверхность разрушения вида Д, образующую со свободной поверхностью пластины угол заострения $\beta = 45 \div 50^\circ$ и исходящую не со свободной поверхности пластины (торец MN на рис. 4), как это было в опыте, где отсутствовал ствол (см. рис. 5), а выше на $\sim 2,5$ мм. Этот результат показал возможность уменьшения размеров конической поверхности разрушения вида Д увеличением толщины стенок ствола, поскольку ствол в зоне разгоняемой пластины, образуя дополнительное кольцо, как бы увеличивает ее диаметр. Поэтому кольцевая волна $З$ (см. рис. 4, б) начи-

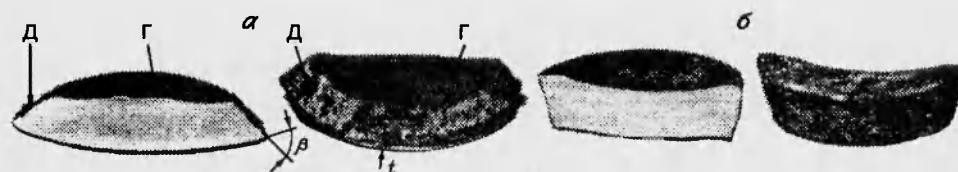


Рис. 7. Осевые разрезы образца b (см. рис. 6) после нагружения: a — откол от пластины с $H = 20$ мм при $\Delta = 5$ мм; b — пластина с $H = 15$ мм при $\Delta = 30$ мм.

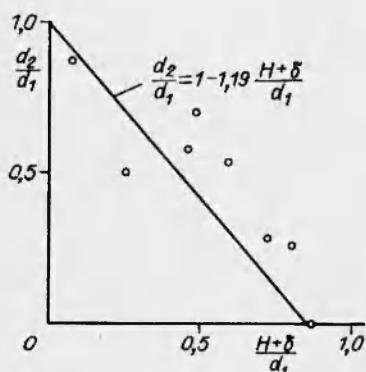


Рис. 8. Зависимость между диаметром и толщиной откола вида Г для пластин различной толщины при разгрузке по схеме рис. 4.

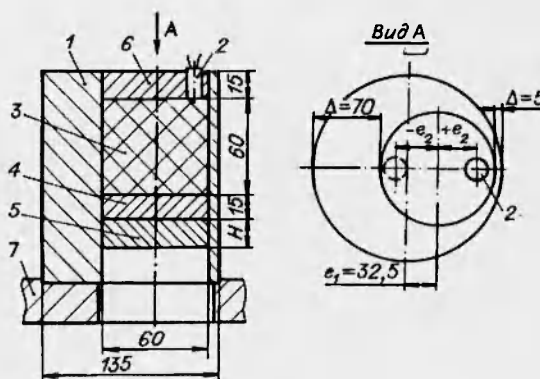


Рис. 9. Схема постановки опытов:

1 — ствол из Ст.3; 2 — электродетонатор; 3 — заряд из ТГ 40/60 с $\rho = 1,68 \cdot 10^3$ кг/м³; 4 — прокладка из магния; 5 — метаемое тело из Ст.3; 6 — стальная накладка; 7 — опорная стальная плита.

нает взаимодействовать с волной 2 не в пластине, а на поверхности этого кольца, и при определенной толщине ствола поверхность разрушения вида Д может миновать саму пластину.

Эти соображения подтверждены в опыте (см. рис. 7,б), где ствол толщиной $\Delta = 30$ мм позволил устранить разрушение вида Д.

В этом же опыте получен неожиданный, потому особенно интересный результат, заключающийся в том, что увеличение толщины корпуса позволило также устранить и гладкий откол вида Г. Последний факт можно объяснить тем, что корпус, сдерживая боковой разлет ПВ, ослабляет и задерживает распространение волны 4 (см. рис. 4,в), встреча которой с волной 2 происходит уже не в теле разгоняемой пластины. К аналогичной тенденции, по нашему мнению, должно приводить и увеличение высоты заряда ВВ.

На рис. 8 линией изображена зависимость (4), в которой, как и в предыдущей серии опытов, принято $\alpha \approx 29^\circ$ и нанесены экспериментальные данные из табл. 2.

Следует особо отметить, что процессы, рассмотренные в рамках схем по рис. 3 и 4, не затрагивают возможных изменений исходных параметров нагружения и характера боковой разгрузки волны 4. Вместе с тем, при коротком ударном импульсе, генерируемом на торце KL , например

Т а б л и ц а 3

H, мм	e_2 , мм	Параметры откола				Характер разрушения (см. рис. 10)
		Угол заострения β , град	Угол наклона откола вида Г γ , град	Толщина откола вида Г $\delta_{\min} \div \delta_{\max}$, мм	Толщина кромки t_{\min} , мм	
15	0	45	0	9,5 ÷ 10,5	4	а
15	-24	45	14	8,5 ÷ 13	6	б
15	+24	45	14	3 ÷ 10	3,0	в
25	+24	45	15	2,5 ÷ 15	3,0	г

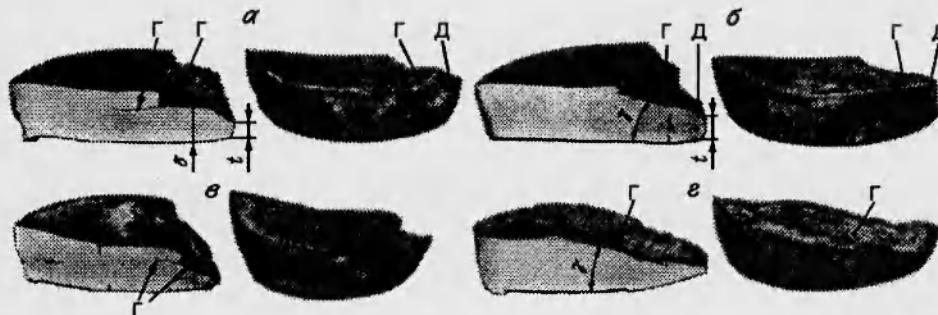


Рис. 10. Осевые разрезы в плоскости симметрии образца 5 (см. рис. 1) после нагружения:

а — пластина с $H = 15$ мм при $e_2 = 0$; б — пластина с $H = 15$ мм при $e_2 = -24$ мм; в — пластина с $H = 15$ мм при $e_2 = 24$ мм; г — откол пластины с $H = 25$ мм при $e_2 = 24$ мм.

ударом тонкой пластины или контактным подрывом тонколистового заряда ВВ, именно разгрузка волны 4 будет определять характерные размеры и местоположение откола вида Г. Поэтому, в частности, проведенное рассмотрение схем процесса можно считать скорее качественным, нежели количественным, которое, тем не менее, может быть полезно при взрывах, соответствующих схемам рис. 3 и 4. Естественно, что более точные прогнозы о развитии реального процесса могут дать только численные расчеты.

В опытах, постановка и результаты которых приведены на рис. 9, 10 и в табл. 3, получило подтверждение влияние степени диссимметризации на образование и пространственную ориентацию поверхностей разрушения видов Г и Д. Ствол 1 выполнялся фактически асимметричным, т. е. с первой степенью осевой симметрии (совмещается сам с собой при повороте на 360°), но он обладал зеркальной симметрией относительно плоскости, проходящей через оси симметрии наружной поверхности и отверстия, которое выполнялось с эксцентриситетом $e_1 = 32,5$ мм, формируя переменную толщину стенок с $\Delta = 5 \div 70$ мм.

Смещением электродетонатора от оси заряда в плоскости симметрии взрывного устройства на величину $e_2 = \pm 24$ мм также задавалась асимметрия, которая уже не нарушала сформированную стволом геометрическую плоскостную симметрию, но резко изменяла степень симметрии взаимодействия волн путем повышения неодновременности выхода ДВ на торец накладки с ~ 1 до 4,3 мкс.

Из результатов этих опытов видно, что с увеличением Δ исчезают отколы вида Д и Г (рис. 10, а). При асимметричном расположении электродетонатора (рис. 10, б-г), обуславливающим косое отражение УВ от свободной границы тела, поверхность разрушения вида Г приобретает наклон с углом γ и увеличивается ее шероховатость, что можно объяснить появлением поперечной волны сдвига и уменьшением амплитуды отраженной ВР. При этом откольное разрушение, как и раньше, наиболее сильно проявляется со стороны тонкой части ствола, а с увеличением толщины пластины и, как следствие, ее инерционности распространяется на всю пластину (рис. 10, г).

Таким образом, анализ полученных результатов убедительно свидетельствует, что изменением симметрии нагружения можно управлять процессом откольных разрушений. Несомненно, что это найдет практическое применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ахмадеев Н. Х.** Динамическое разрушение твердых тел в волнах напряжений. Уфа, 1988.
2. **Литвинов Б. В., Лебедев М. А.** Симметрия и взрывные устройства // Тез. докл. III Забабахинские науч. чтения, Челябинск, 1991. С. 80.
3. **Лебедев М. А., Литвинов Б. В.** Особенности методологии создания взрывных устройств // Тез. докл. X Симпозиум по горению и взрыву, Черногоровка, 1992. С. 41-43.
4. **Райнхарт Дж., Пирсон Дж.** Поведение материалов при импульсных нагрузках. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.
5. **Кольский Г.** Волны напряжения в твердых телах. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
6. **Альтшулер Л. В.** Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи физ. наук. 1992. Т. 85, № 2. С. 197-258.
7. **Иванов А. Г., Новиков С. А.** Об ударных волнах разрежения в железе и стали // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1961. Т. 40, № 6. С. 1880-1882.
8. **Иванов А. Г., Новиков С. А., Тарасов Ю. И.** Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения // Физика тверд. тела. 1962. Т. 4, № 1. С. 249-260.

Поступила в редакцию 17/V 1993 г.
