

В качестве иллюстрации приводим примеры.

1. Из эксперимента известна зависимость $u(t)$, а следовательно, и обратная зависимость $t(u)$. p - u -зависимость получаем непосредственным интегрированием (3) с подстановкой $i(t)$ по (4)

$$p(u) = p_0 + \rho_0 x_0 \int_0^u \frac{du}{t(u)}, \quad (4)$$

а зависимость $p(v)$ находим в параметрическом виде по (4) и (5)

$$v(u) = v_0 - \frac{1}{\rho_0^2 x_0^2} \int_0^u t(u) du. \quad (5)$$

2. Аналогичным образом по известному из эксперимента профилю давлений $p(t)$, представив результаты эксперимента в виде обратной функции $t = t(p)$, получаем

$$u(p) = \frac{1}{\rho_0 x_0} \int_{p_0}^p t(p) dp, \quad (6)$$

$$v(p) = v_0 - \frac{1}{\rho_0^2 x_0^2} \int_{p_0}^p t^2(p) dp. \quad (7)$$

3. Если в эксперименте определена зависимость $x(x_0, t_1)$ в известный момент времени t_1 в движущейся среде, то воспользовавшись законом сохранения массы $v = v_0 dx/dx_0$, найдем $v = v_0 f(x_0)$ и обратную функцию $x_0(v)$. Из (1) и (3) получим

$$p(v) = p_0 - \frac{\rho_0^2}{t_1^2} \int_{v_0}^v x_0^2(v) dv \quad (8)$$

и в параметрическом виде (v — параметр) — $p(u)$ -зависимость по (8) и (9)

$$u(v) = - \frac{\rho_0}{t_1} \int_{v_0}^v x_0(v) dv. \quad (9)$$

Поступила в редакцию 29/IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Ландау, Н. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ, 1953.
2. Л. В. Альшuler. УФН, 1965, 85, 2, 1997.
3. В. Н. Зубарев. ПМТФ, 1965, 2, 54.
4. М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1971.

ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИН ПРИ СИНХРОННОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ЗАРЯДА ВВ В НЕСКОЛЬКИХ ТОЧКАХ

В. А. Огородников, А. Г. Иванов

(Москва)

В ряде задач, связанных с применением взрыва, часто заряд взрывчатого вещества (ВВ) инициируется синхронно в нескольких точках [1, 2]. Особый интерес представляет поведение облицовки заряда ВВ, инициирование которого осуществляется не с помощью генератора пло-

Таблица 1

Материал пластины	x_1 , мм	x_2 , мм	A , мм	w_1 , км/с	w_2 , км/с	K	H/a
Сталь	10,5	12,9	2,4	1,6	2,0	1,0	1,18
	10,6	12,3	1,7	1,6	1,9	1,0	1,74
	11,0	11,6	0,6	1,6	1,7	1,0	2,35
Медь	11,0	15,5	4,5	1,7	2,3	1,9	1,18
	9,9	12,5	2,6	1,4	1,8	1,5	1,74
	10,7	11,6	0,9	1,6	1,7	1,5	2,35
Свинец	13,1	17,8	4,7	2,0	2,7	2,0	1,18
	10,2	13,2	3,0	1,6	2,0	1,8	1,74
	11,8	13,7	1,9	1,8	2,1	3,2	2,35

Таблица 2

Материал пластины	x_1 , мм	x_2 , мм	A , мм	w_1 , км/с	w_2 , км/с	K
Свинец	1,7	2,6	0,9	1,2	1,8	1,1
	8,4	10,1	1,7	2,4	2,9	1,0
	15,0	16,4	1,4	3,0	3,3	0,6
	23,4	24,3	0,9	3,4	3,5	0,3
Сталь	1,5	2,3	0,8	1,0	1,5	1,0
	9,6	11,3	1,7	2,9	3,4	1,0
	14,6	17,1	2,5	3,0	3,6	1,0
	24,1	26,7	2,6	3,5	3,8	1,0
Медь	7,9	9,6	1,7	2,3	2,8	1,0
	15,4	18,0	2,6	2,9	3,4	1,0

ских волн [3], а синхронно в нескольких точках на свободной поверхности заряда. Взаимодействие детонационных волн (ДВ), распространяющихся от точек инициирования, приводит к появлению отраженных волн, которые, в свою очередь, продолжают взаимодействовать между собой.

В области столкновения двух и более волн при определенных углах их падения может реализоваться такая ситуация, когда фронт ДВ будет представлять собой комбинацию расходящихся сферических волн и волн Маха [4] (например, при синхронном инициировании заряда ВВ в точках, расположенных по вершинам квадратов). Взаимодействие такой конфигурации волн с облицовкой заряда, например, с пластиной должно приводить к тому, что максимальные давления на пластину будут реализовываться в области волн Маха (центр квадрата, где сталкиваются четыре детонационных волны), а минимальные давления — под проекциями точек инициирования. Неравномерность воздействия на пластину может привести к локальным возмущениям на ее свободной поверхности. В зависимости от расстояния между точками инициирования, толщин слоя ВВ и пластины, а также свойств материала пластины в областях с достаточно большими градиентами давления могут возникать местные отколы.

Экспериментально методами импульсной рентгенографии и манганинового датчика давления исследован характер движения свободной поверхности пластин из стали (Ст. 3), меди (М1) и свинца толщиной $\Delta = 1,2$ и 4 мм при ее смещении на 1—24 мм от начального положения. Выбор этих материалов обусловлен тем, что они близки по плотности и позволяют проследить влияние прочности и вязкости материала на развитие возмущений и отколы. Заряд ВВ диаметром 120 и высотой $H = 20$ или 40 мм инициировался синхронно в точках, расположенных в два ряда по вершинам квадратов со стороной $a = 11,5; 17; 23$ и 34 мм.

В первой серии опытов исследовалось движение относительно толстых пластин ($\Delta/H = 4/40$). Результаты обработки рентгенограмм приведены в табл. 1. Здесь x_1, x_2 — расстояния, проходимые участками пластины под проекциями точек инициирования и центров квадратов, где сталкиваются четыре детонационные волны, от их начального положения; $A = x_1 - x_2$ — амплитуда возмущения; w_1, w_2 — средние скорости участков пластины на расстояниях x_1 и x_2 .

Во второй серии исследовалось движение относительно тонких пластин ($\Delta/H = 1/40$) при инициировании заряда ВВ в точках с параметрами разбиения $H/a = 1,74$. Результаты обработки рентгенограмм приведены в табл. 2.

Таблица 3

Δ , мм	H , мм	H/a	x_1 , мм	x_2 , мм	A , мм	w_1 , км/с	w_2 , км/с
4	40	1,18	11,0	15,7	4,7	1,7	2,4
		1,74	9,9	12,5	2,6	1,4	1,8
		2,35	10,7	11,6	0,9	1,6	1,7
		3,80	10,4	10,4	0	1,5	1,5
2	20	0,87	4,4	6,8	2,4	1,1	1,6
		1,18	3,9	5,2	1,3	1,2	1,6
		1,74	3,4	3,4	0	0,9	0,9

В третьей серии опытов с целью проверки возможности моделирования возмущений и откольного разрушения в геометрически подобных зарядах исследовалась форма свободной поверхности пластины из меди толщиной $\Delta = 2$ и 4 мм при детонации на их поверхности заряда ВВ с $\Delta = 20$ и 40 мм. В табл. 3 даны результаты обработки опытов. Амплитуда возмущений A и величины скоростей w в табл. 1—3 определены с точностью $\pm 10\%$.

Результаты опытов свидетельствуют о том, что свойства материала пластин по-разному влияют на характер развития возмущений у относительно толстых и тонких пластин. Для пластин с $\Delta = 4$ мм в области проекций точек столкновения четырех ДВ на свободной поверхности пластин наблюдаются локальные отколы.

В табл. 1 приведены величины коэффициентов K , характеризующих отношение амплитуды возмущений на свободной поверхности у пластины из исследуемого материала к амплитуде соответствующих возмущений у пластины из стали как наиболее прочного материала. Для пластин из менее прочных материалов значения K в среднем сохраняются для опытов с различной частотой точек инициирования ($H/a = 1,18; 1,74; 2,35$) и составляют 1,6 и 2,3 для меди и свинца соответственно. Это указывает на то, что в случае относительно толстых пластин и синхронного инициирования заряда ВВ в нескольких точках прочность материала оказывает стабилизирующее воздействие на формирование возмущений.

Откольные тарелочки в центральной области квадратов образуются при отражении УВ от свободной поверхности пластины, когда запас упругой энергии растяжения в волне разгрузки окажется соизмерим с энергией разрушения материала пластины [5]. Из [5] следует, что толщина откольных тарелочек будет увеличиваться при переходе от свинца к меди и стали, так как величина энергии разрушения для этих материалов составляет 0,9; 3 и 9 Дж/см² соответственно. Чем толще откольная тарелочка, тем больше затухание скорости свободной поверхности рассматриваемого участка пластины и, следовательно, меньше амплитуда возмущений.

Для пластин толщиной 1 мм возмущения формируются также в центре квадратов, однако отколы на свободной поверхности пластин, по-видимому, не реализуются, и возмущения имеют изгибный характер. Анализ результатов показывает, что характер развития возмущений у пластин из стали и меди качественно совпадает. У пластин из свинца со временем происходит удвоение числа возмущений за счет появления дополнительных возмущений под проекциями точек инициирования и наблюдается размытие свободной поверхности пластины, указывающее на наличие градиента плотности по толщине пластины.

Попытаемся объяснить характер развития возмущений у относительно тонких пластин с привлечением вязкопластической модели вещества. Согласно этой модели величина динамического предела текучести может быть представлена в виде

$$\sigma_s = \sigma_0(p, T) + \eta(p, T)\dot{\epsilon},$$

где σ_0 — статический предел текучести; η — динамический коэффициент вязкости; p, T — давление и температура, характеризующие условия нагружения; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации.

В табл. 4 приведены результаты оценок отдельных членов этого выражения для стали и свинца в условиях описываемого эксперимента. Видно, что на характер развития возмущений может влиять как прочность, так и вязкость материала пластины. Поскольку возмущения у пластин имеют изгибный характер, то прочностные и вязкие силы должны препятствовать росту возмущений. Результаты опытов по измерению профилей давления с помощью манганиновых датчиков показывают, что амплитуда давления в УВ, выходящей на свободную поверхность пластины, под проекциями точек инициирования и столкновения двух и четырех ДВ состав-

Таблица 4

Металл	η_1 , г/(см·с)	ϵ , 1/с	$\eta \epsilon$, г/(см·с ²)	σ_0 , г/(см·с ²)	σ_s , г/(см·с ²)
Сталь	$6 \cdot 10^4$	10^6	$6 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^9$	$6,2 \cdot 10^{10}$
Свинец	10^{-2}	10^6	10^4	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$

ляет 210, 220, 450 кбар для пластин из стали и 220, 240, 450 кбар для пластин из свинца. На начальном участке движения пластины давления под проекциями точек столкновения ДВ и инициирования, а также их разность, составляют сотни килобар и намного превышают динамический предел текучести для материалов пластин. Поэтому на начальной стадии полета пластин независимо от материала возмущения качественно и количественно близки.

В дальнейшем возмущения растут до тех пор, пока пластины не разгрузятся до состояния, при котором разность давлений в отдельных участках не будет соизмерима по величине с динамическим пределом текучести. При этом за счет диссипации энергии, связанной с вязкостью и прочностью, наступает остановка роста возмущений. Из табл. 4 следует, что на этой стадии движения поведение пластин из свинца и стали действительно будет отличаться. Максимальные величины давлений, которые реализуются в стали, намного меньше давлений, при которых материал пластин плавится на первой УВ.

В свинце в отдельных областях (центры квадратов) реализуются давления, соизмеримые с давлением, при котором происходит плавление свинца на первой УВ. При плавлении прочность свинца $\sigma_0 \approx 0$, а вязкость уменьшается на несколько порядков и составляет $\sim 10^{-2}$ П [6]. Согласно одномерным расчетам, давление в продуктах взрыва на границе с пластиной, пролетевшей ~ 20 мм от своего начального положения, составляет ~ 1 кбар. В очагах повышенного давления, связанных, например, со столкновением отраженных УВ в продуктах взрыва, амплитуда давления должна быть выше.

Для расплавленного свинца, который потерял прочность, эти очаги повышенного давления могут транслироваться на свободную поверхность пластины и быть наиболее вероятной причиной появления возмущений на свободной поверхности пластины под проекциями точек инициирования. Для пластин из стали, которые не плавятся на УВ, амплитуда давления в упомянутых очагах оказывается недостаточной для преодоления силы прочности материала. Поэтому возмущений под проекциями точек инициирования не наблюдается.

Таким образом, для относительно тонких пластин возмущения, связанные с синхронным инициированием заряда ВВ в нескольких точках, носят изгибный характер, и остановка роста возмущений происходит при разгрузке материала пластины за счет диссипации энергии, связанной с вязкостью и прочностью, которые оказывают стабилизирующее воздействие.

Обратимся к третьей серии опытов. Казалось бы, что из соображений геометрического подобия, формы свободной поверхности пластин в опытах с одинаковым значением H/a должны совпадать, но этого не наблюдается. По-видимому, это связано с механизмом формирования возмущений в больших и малых моделях. У пластин большой модели в центре квадратов явно выражены локальные отколы, а у пластин малой модели их нет. Различие может быть объяснено тем, что у пластин малой модели запаса упругой энергии в волне разгрузки, идущей от свободной поверхности пластины, может оказаться недостаточно для реализации откола.

Поступила в редакцию 21/IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Иванов, С. Н. Новиков. ФГВ, 1980, 16, 3.
2. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, Л. И. Кочкин. ФГВ, 1977, 13, 4.
3. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 2.
4. Е. А. Феоктистова. Докл. АН СССР, 1961, 136, 6.
5. А. Г. Иванов. ФГВ, 1975, 11, 3.
6. В. Н. Минеев, Е. С. Савинов. ЖЭТФ, 1967, 52, 3.

ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ВНУТРЕННЕМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

*А. И. Белов, В. Е. Клаповский, В. А. Корнило,
В. Н. Минеев, В. С. Шиян*

(Москва)

В большинстве исследований, касающихся динамики оболочек при внутреннем импульсном нагружении, как правило, рассматриваются идеализированные системы с центрально-симметричным (или осесимметричным) нагружением. В реальных системах возможны отклонения от симметричной схемы нагружения, связанные с нарушением симметрии положения заряда или асимметричным разлетом продуктов детонации. Поведение сферической оболочки при эксцентричном положении заряда рассмотрено в [1, 2]. Исследование носит теоретический характер и ограничено анализом методов решения уравнения движения оболочки. Приведенные экспериментальные данные не позволяют установить влияние эксцентриситета на поле динамических деформаций оболочки.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования упругих динамических деформаций наполненной воздухом сферической оболочки при взрыве в ее полости сосредоточенного заряда ВВ для случаев его центрального и эксцентричного положений. В качестве исследуемой модели использована сферическая оболочка, выполненная из стали 30ХГСА, с радиусом внутренней поверхности $R = 0,215$ м и относительной толщиной стенки $\delta/R = 0,046$ (рис. 1, а). В зоне верхнего полюса оболочки вмонтирован герметичный загрузочный патрубок диаметром 130 мм, толщина стенки которого соответствовала толщине оболочки. Оболочку нагружали взрывом шарового заряда массой 55 г (энерговыведение 1140 кал/г), отношение радиуса оболочки к радиусу заряда 10. Смещение заряда в случае его эксцентричных положений осуществлялось вдоль вертикальной оси оболочки в направлении нижнего полюса.

Проведены измерения деформаций внешней поверхности оболочки датчиками ПКП-10-100, включенными в измерительную цепь по потенциометрической схеме (рис. 1, б). В состав измерительной схемы входили десятиканальный тензоусилитель с полосой пропускания 0—100 кГц и регистраторы — осциллографы С8-13. Для случая центрально-симметричного положения заряда исследованы динамические давления на внутренней поверхности оболочки с помощью кварцевого пьезодатчика, установленного в зоне экватора оболочки.

В качестве характеристик процесса динамических деформаций приняты амплитуда деформаций в первом полупериоде колебаний ϵ_1 и максимальные за историю колебаний деформации ϵ_{\max} . Их значения для исследованных зон оболочки в зависимости от величины эксцентриситета заряда e приведены в таблице.

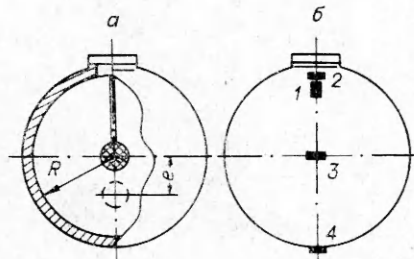


Рис. 1. Эскиз исследований оболочки (а) и схема размещения тензодатчиков (б).