

11. Адушкин В. В., Зыков Ю. Н., Либин В. Я. ФТПРПИ, 1988, 4, 35.
12. Шацкевич А. Ф. // Взрывное дело. № 76/33.— М.: Недра, 1976.
13. Кузнецов В. М., Шацкевич А. Ф. ФГВ, 1977, 13, 5, 733.
14. Куликов В. И., Шацкевич А. Ф. ФГВ, 1974, 7, 3, 441.
15. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике.— М.: Наука, 1987.
16. Обербек В. Р. // Механика образования воронок при ударе и взрыве.— М.: Мир, 1977.
17. Зельманов И. Л., Кануков А. И., Куликов В. И. и др. ПМТФ, 1969, 2, 73.
18. Коротков П. Ф., Просвирина Б. М. ПМТФ, 1980, 2, 143.

г. Киев

Поступила в редакцию 23/1 1989,
после доработки — 5/V 1989

УДК 539.4

В. К. Голубев, И. Р. Трунин

О ПРОСТОМ ОПИСАНИИ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Определение условий откольного разрушения материалов при высокоинтенсивном взрывном нагружении — задача более сложная и трудоемкая по сравнению с низкоинтенсивным ударным нагружением. Критические условия разрушения в последнем случае можно достаточно просто определить визуально и при металлографическом обследовании нагруженных образцов, а также с помощью элементарных оценок силовых и временных условий нагружения [1]. В случае взрывного нагружения один из основных методов определения условий откольного макроразрушения материалов состоит в следующем. Путем непосредственного сохранения в результате мягкого торможения либо в процессе регистрации при разлете определяется толщина первого откольного слоя. Далее рассчитывается максимальное отрицательное давление p_t в плоскости образца соответствующей глубине макроскопической откольной трещины. В работе [2] методом импульсной рентгенографии получены результаты по откольному разрушению Al, Cu, Ni и Pb при взрывном нагружении.

Наряду с определенными достоинствами, следует отметить также и присущие этому методу недостатки. Так, для уравнений состояния продуктов детонации (ПД) и материала нагружаемого образца, а также для условий инициирования заряда ВВ используются некоторые приближения, что неизбежно приводит к систематической неопределенности полученных результатов. Однако основную неопределенность здесь все же вносит априорное предположение о сохранении сплошности материала вплоть до момента его макроразрушения, т. е. неучет условий зарождения откольных повреждений при более низких растягивающих напряжениях, кинетики процесса разрушения и соответствующей релаксации напряжений, что рассматривалось в работе [3]. В связи с этим метод дает верхнюю оценку реализуемой в таких условиях прочности, хотя и остается в настоящее время действенным и фактически основным для определения условий откольного макроразрушения при взрывном нагружении.

Найденные в [2] значения откольной прочности для рассматриваемых четырех металлов характеризуются линейным ростом с увеличением корня квадратного из градиента давления в растягивающем импульсе $\Delta p/\Delta x$:

$$p_t = p_0 + a\sqrt{\Delta p/\Delta x}. \quad (1)$$

Использование полученного критерия для расчета условий множественного откольного разрушения образца из Al привело к хорошему согла-

Таблица 1

Материал	ρ , г/см ³	c_0 , км/с	λ	h	a	b	d	p_c^* , ГПа	Δp_t , ГПа
Al	2,71	5,25	1,39	0,304	0,638	$1,35 \cdot 10^{-2}$	3,27	26,5	0,24
Cu	8,90	3,96	1,50	0,424	0,592	$9,45 \cdot 10^{-3}$	2,39	32,1	0,10
Ni	8,86	4,65	1,45	0,552	0,602	$8,19 \cdot 10^{-3}$	3,04	35,0	0,28
Pb	11,3	2,03	1,52	0,121	0,503	$8,50 \cdot 10^{-3}$	1,37	24,7	0,08

сию расчетных и экспериментальных результатов. В [4] отмечается, что критерий такого вида и в настоящее время применяется в программах численного расчета процессов взрывного нагружения.

Авторами данной работы рассматривалось откольное разрушение некоторых металлов в таких условиях взрывного нагружения, когда существенным образом менялось давление p_c в выходящей на свободную поверхность образца УВ. Получено, что в этом случае результаты не могут быть достаточно хорошо описаны предложенной в [2] однопараметрической зависимостью (1), поскольку начинает проявляться явная тенденция снижения определяемой таким образом откольной прочности с увеличением давления предшествующего ударно-волнового сжатия. Введение же в качестве дополнительного параметра величины p_c позволило описать имеющуюся совокупность результатов простым выражением вида

$$p_t = p_0 + a(1 - bp_c) \sqrt{\Delta p / \Delta x}.$$

Поставлена также задача выяснить возможности более общего, чем в [2], описания условий откольного разрушения Al, Cu, Ni и Pb. В качестве основы анализа используются экспериментальные результаты, полученные в работе [2].

Условия взрывного нагружения образцов оценивали методом гидродинамического расчета течения в преграде при взрыве на ее поверхности заряда ВВ (см., например, [5, 6]). Уравнение состояния продуктов детонации бралось в виде кубической политропы. В качестве уравнений состояния рассматриваемых металлов использовались их ударные адиабаты в виде линейных соотношений между массовой и волновой скоростями $D = c_0 + \lambda u$. Плотности и коэффициенты ударных адиабат металлов взяты из [6] (табл. 1). Отрицательное давление в плоскости откола рассчитывали по формуле

$$p_t = 0,5\rho c_0(w_0 - w_1),$$

где w_0 — скорость свободной поверхности образца в момент выхода на нее УВ; w_1 — через время $\Delta t = 2h_s/c_0$; h_s — толщина откольного слоя. Градиент давления в растягивающем импульсе — p_t/h_s , поскольку форма растягивающего импульса при такого рода нагружении близка к треугольной. В табл. 2 приведены результаты регистрации толщин отко-

Таблица 2

Толщина, мм			Давление, ГПа		$\Delta p / \Delta x$, ГПа/мм
h_e	h_t	h_s	p_c	p_t	
100	25	2,4	36,1	3,04	1,27
51	25	2,2	32,1	4,06	1,85
38,1	25	1,95	30,0	4,20	2,15
25	25	1,7	26,7	4,61	2,71
12,7	25	1,65	21,2	5,13	3,11
19	12	1,3	30,3	5,55	4,27
12,7	12	1,2	27,1	5,98	4,98
6,37	6	0,85	27,2	7,98	9,39

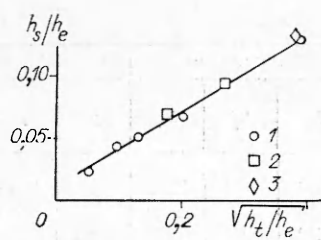


Рис. 1. Зависимость толщины откольного слоя от толщины заряда и образца из меди.

h_t , мм: 1 — 25, 2 — 12, 3 — 6.

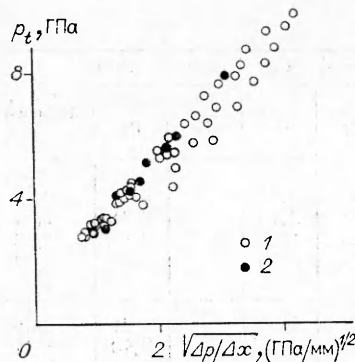


Рис. 2. Влияние градиента давления в растягивающем импульсе на отрицательное давление в плоскости откола для меди.

1 — результаты численного эксперимента (см. табл. 3); 2 — из [2] (см. табл. 2).

ных слоев в медных образцах [2] и результаты сделанных оценок условий откольного разрушения (h_e , h_t — толщина заряда ВВ и образца).

Из табл. 2 видно, что выявление отдельного влияния градиента давления в растягивающем импульсе и давления в УВ на условия откольного разрушения не представляется возможным в связи с ограниченностью имеющихся данных. Однако анализ результатов по определению h_s показал, что они могут быть представлены в виде простых зависимостей вида

$$h_s/h_e = l + m \cdot \sqrt{h_t/h_e}, \quad (2)$$

где коэффициенты l и m составляют 0,012 и 0,33 для Al, 0,012 и 0,30 для Cu, 0,016 и 0,42 для Ni и 0,004 и 0,18 для Pb (все толщины в мм). При построении зависимостей для алюминия и свинца не использовались по две сомнительных точки.

На рис. 1 представлены экспериментальные точки и построенная на их основе линейная (в используемых координатах) зависимость (2). На основе полученных зависимостей можно искусственно увеличить число «экспериментальных» точек, взяв желаемые толщины зарядов ВВ и образцов и получая реализуемые в этих случаях толщины откольных слоев. Рассматривалось по несколько точек при конкретном давлении p_c , но различающихся масштабом системы заряд — образец. В связи с приближенностью подхода проводилась лишь достаточно близкая экстраполяция зависимости (2). Максимальную толщину заряда ВВ принимали лишь в 2 раза большей, а минимальную толщину образца — в 2 раза меньшей, чем в [2]. Выбранные значения h_e , h_t , полученные толщины откольных слоев и рассчитанные условия откольного разрушения для меди приведены в табл. 3. На рис. 2 полученные результаты показаны в координатах $\sqrt{\Delta p/\Delta x}$, p_t , т. е. в однопараметрическом представлении. То же самое сделано и для других металлов, однако полный анализ проведем на примере меди, а для остальных металлов дадим конечные результаты.

Наблюдаемый для всех металлов значительный разброс точек указывает на недостаточную точность принятого в [2] простого однопараметрического соотношения (1). По крайней мере два фактора должны быть учтены для более корректного описания условий откольного разрушения. Во-первых, это необходимость ухода от произвола в выборе показателя степени при градиенте давления в растягивающем импульсе (в [2] он равен 0,5), что достигается путем представления данных в координатах $\lg(\Delta p/\Delta x) - \lg(p_t - p_0)$, а во-вторых, обязательность учета влияния давления ударно-волнового сжатия.

Эти факторы учтены в работе следующим образом. Первоначально отмечалось, что уменьшение h_t/h_e , т. е. рост ударно-волнового давления,

Таблица 3

Толщина, мм			Давление, ГПа		$\Delta p/\Delta x$, ГПа/мм	Толщина, мм			Давление, ГПа		$\Delta p/\Delta x$, ГПа/мм
h_e	h_t	h_s	p_c	p_t		h_e	h_t	h_s	p_c	p_t	
200	20	3,74	39,5	2,89	0,77	100	60	3,52	30,7	3,08	0,88
100	10	2,15		3,31	1,54	50	30	2,24		3,88	1,73
50	5	1,27		3,84	3,02	20	12	1,28		5,34	4,17
30	3	0,88		4,37	4,97	5	3	0,58		8,84	15,2
200	40	4,30	37,2	2,91	0,68	100	80	3,88	28,5	2,94	0,76
100	20	2,54		3,40	1,34	30	24	1,83		4,44	2,43
50	10	1,55		4,09	2,64	10	8	0,97		6,64	6,85
25	5	0,97		5,00	5,15	6,25	5	0,75		7,91	10,6
15	3	0,67		5,87	8,39	3,75	3	0,56		9,51	16,8
200	60	4,72	35,2	2,84	0,60	100	100	4,20	26,7	2,78	0,66
100	30	2,84		3,36	1,18	30	30	2,00		4,25	2,12
50	15	1,76		4,09	2,32	10	10	1,07		6,41	6,00
16,67	5	0,87		5,79	6,65	5	5	0,73		8,28	11,3
10	3	0,64		6,92	10,8	3	3	0,56		9,95	17,9
100	40	3,10	33,4	3,29	1,06	50	70	3,11	24,0	3,21	1,03
50	20	1,94		4,03	2,08	20	28	1,83		4,54	2,49
20	8	1,09		5,48	5,03	10	14	1,24		5,95	4,79
12,5	5	0,82		6,45	7,85	5	7	0,85		7,75	9,07
7,5	3	0,61		7,73	12,7	3	4,2	0,65		9,32	14,3
100	50	3,32	32,0	3,19	0,96	50	90	3,45	21,9	2,94	0,85
50	25	2,10		3,96	1,89	20	36	2,04		4,21	2,06
20	10	1,19		5,43	4,56	10	18	1,39		5,55	3,98
10	5	0,79		6,92	8,75	5	9	0,96		7,26	7,56
6	3	0,59		8,33	14,1	3	5,4	0,73		8,75	11,9

приводит к снижению коэффициента k в соотношениях

$$\lg(p_t - p_0) = h + k \lg(\Delta p/\Delta x),$$

построенных по совокупностям точек, соответствующим конкретным значениям h_t/h_c . Величины p_0 (в ГПа), ориентировочно характеризующие условия разрушения при статическом нагружении, взяты следующими: 0,1, 0,5, 1,0 и 0 для Al, Cu, Ni и Pb соответственно. На рис. 3 приведены зависимость $k(p_c)$ и аппроксимация этих результатов линейной (кривая 1)

$$k = f(1 - sp_c) \quad (3)$$

и двухзвенной (кривая 2)

$$k = a\{1 - b[p_c + d(p_c - p_c^*)\eta(p_c - p_c^*)]\} \quad (4)$$

зависимостями, где $\eta(p_c - p_c^*)$ — единичная функция Хевисайда; p_c^* — точка излома. В результате линейной аппроксимации всех точек в логарифмических координатах с учетом выявленного влияния p_c и последующего перехода к исходным координатам получаем функциональные эмпирические соотношения, связывающие отрицательное давление в плоскости откола с градиентом давления в растягивающем импульсе и давлением ударно-волнового сжатия. Для (3) получаем

$$p_t = p_0 + 10^h (\Delta p/\Delta x)^{f(1-sp_c)}, \quad (5)$$

а для (4)

$$p_t = p_0 + 10^h \cdot B, \quad (6)$$

где $B = (\Delta p/\Delta x)^{a\{1-b[p_c+d(p_c-p_c^*)\eta(p_c-p_c^*)]\}}$. Совокупность всех точек из табл. 3 и построенная зависимость (6) приведены на рис. 4. В качестве

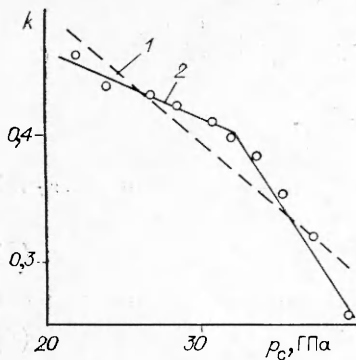


Рис. 3. Влияние давления ударно-волнового сжатия на значение коэффициента k для меди.

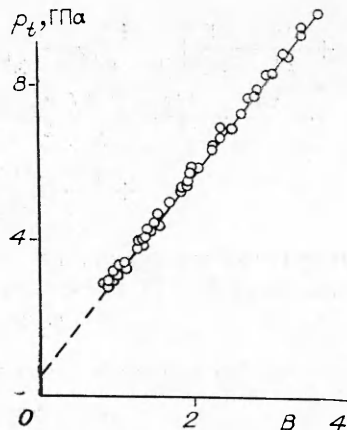


Рис. 4. Влияние градиента давления в растягивающем импульсе и давления ударно-волнового сжатия на отрицательное давление в плоскости откола для меди.

характеристики разброса точек относительно полученных величин использовалось среднее квадратичное отклонение

$$\Delta p_t = \sqrt{\sum_{i=1}^n [p_t(\Delta p/\Delta x, p_c) - p_{ti}]^2 / (n-1)}.$$

Для меди по зависимости (6) получается $\Delta p_t = 0,10$ ГПа, а по (5) $\Delta p_t = 0,26$ ГПа, что указывает на целесообразность использования более точной двухзвенной зависимости при аппроксимации данных. Полученные для всех металлов коэффициенты эмпирического соотношения (6), а также определенные значения Δp_t представлены в табл. 1.

Если параметр $\Delta p/\Delta x$ характеризует скорость либо время нагружения, то величина p_c прежде всего связана с температурой остаточного ударно-волнового разогрева. Основы метода расчета температур при ударно-волновом сжатии и последующей разгрузке приводились, например, в [8, 9]. Можно сделать элементарные оценки этих температур снизу, т. е. без учета диссипативных эффектов. Температура на ударной адиабате описывается уравнением

$$\frac{dT}{dz} + \frac{\gamma T}{1-z} = \frac{\lambda c_0^2 z^2}{c_v (1-\lambda z)^3},$$

где γ — параметр Грюнайзена; c_v — удельная теплоемкость; $z = (v_0 - v)/v_0$; v — удельный объем. Решением этого уравнения, удовлетворяющим начальным условиям $T = T_0$ при $z = 0$, будет

$$T = \frac{1}{(1-z)^\gamma} \left(\frac{\lambda c_0^2}{c_v} \int_0^z \frac{z^2 (1-z)^\gamma dz}{(1-\lambda z)^3} + T_0 \right).$$

Интеграл здесь легко берется для $\gamma = 1, 2$ и 3 . Чтобы получить аналитическое решение $T(z)$ для произвольного значения γ из этого диапазона, разложим подынтегральный бином $(1-z)^\gamma$ в ряд Тейлора, ограничившись четырьмя первыми членами разложения. Проинтегрировав, получим выражение для температуры при ударно-волновом сжатии:

$$T_1 = \frac{1}{(1-z)^\gamma} \left\{ \frac{\lambda c_0^2}{c_v} \left[\left(1 - \frac{3\gamma(\gamma-1)}{2\lambda^2} + \frac{4\gamma(\gamma-1)(\gamma-2)}{3\lambda^2} \right) \left[\left(\frac{2z}{\lambda^2} - \frac{3}{2\lambda^3} \right) \frac{1}{(1-\lambda z)^\gamma} - \frac{1}{\lambda^2} \ln(1-\lambda z) + \frac{3}{2\lambda^3} \right] - \left(\gamma - \frac{3\gamma(\gamma-1)}{2\lambda} + \frac{\gamma(\gamma+1)(\gamma+2)}{\lambda^2} \right) \left[\left(1 - \frac{z^5}{\lambda} + \frac{2z^2}{\lambda^2} + \right. \right. \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2z}{\lambda^3} - \frac{5}{5\lambda^4} \left) \frac{1}{(1-\lambda z)^2} - \frac{3}{\lambda^4} \ln(1-\lambda z) + \frac{5}{2\lambda^4} \right] + \left(\frac{\gamma(\gamma-1)}{2\lambda^3} - \right. \\
& \left. - \frac{\gamma(\gamma-1)(\gamma-2)}{2\lambda^4} \right) \left[\left(\frac{z}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda^2} \right) \frac{1}{(1-\lambda z)^2} - \frac{z^2}{2} + \frac{1}{2\lambda^2} \right] + \\
& \left. + \frac{\gamma(\gamma-1)(\gamma-2)z^3}{18\lambda^3} \right] + T_0 \}.
\end{aligned}$$

Температура материала после разгрузки T_2 связана с температурой на ударной адиабате T_1 уравнением изоэнтропы

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^\gamma. \quad (7)$$

Тепловое расширение до конечного состояния описывается выражением

$$v_2 - v_0 = v_0 \alpha (T_2 - T_0), \quad (8)$$

где α — объемный коэффициент термического расширения. Решая совместно уравнения (7) и (8) и ограничиваясь двумя первыми членами разложения биннома $\left(1 + \frac{v_2 - v_0}{v_0}\right)^{-\gamma}$, получим зависимость конечной температуры от температуры и удельного объема в УВ

$$T_2 = T_1 v_1^\gamma / \left[v_0 + \frac{\alpha v_0 (T_1 v_1^\gamma - T_0 v_0^\gamma)}{v_0^\gamma + \gamma \alpha T_1 v_1^\gamma} \right]^\gamma.$$

В результате сделанных оценок получено, что остаточный разогрев всех металлов, за исключением свинца, в условиях проведенных опытов незначителен по сравнению с температурой плавления. Свинец плавится при разгрузке от ударно-волнового давления 27 ГПа.

Основной результат работы состоит в разработке простого экспериментально-расчетного метода построения соотношения, описывающего условия откольного разрушения материалов в широком диапазоне параметров взрывного нагружения. Сущность метода содержит два ключевых момента. Во-первых, на основании ограниченных экспериментальных данных по регистрации толщин откольных слоев в нескольких опытах со значительно меняющимся масштабом системы заряд — образец строится линейное соотношение, связывающее толщины откольных слоев, образцов и зарядов ВВ. С помощью этого соотношения может быть получено необходимое количество значений толщин откольных слоев для нескольких различных масштабных соотношений между толщинами заряда ВВ и образца. Во-вторых, описанным в работе способом проводится расчетная обработка полученных таким образом результатов. В итоге строится зависимость реализующегося в плоскости откола отрицательного давления от градиента давления в растягивающем импульсе и давления в УВ. Она имеет простой вид и удобна для применения в программах численного расчета, подобных приведенным в работе [4]. В случае набора дополнительных «экспериментальных точек» в области интерполяции правомерность метода и точность полученных результатов не вызывают сомнений. В случае же набора этих точек в области экстраполяции точность результатов будет некоторым образом снижаться. Поэтому еще раз укажем на необходимость проведения базовых экспериментов на системах со значительно меняющимся масштабом.

Полученные результаты показывают, что описание условий откольного разрушения материала при взрывном нагружении с помощью двухпараметрической зависимости (6) существенно повышает точность прогнозирования разрушения по сравнению с однопараметрической зависимостью (1). Совершенно естественным является выбор в качестве второго параметра давления в ударной волне p_c . Во-первых, как уже отмечалось, увеличение давления приводит к повышению температуры остаточного разогрева материала. Повышение же T приводит, как правило, к некоторому снижению критической нагрузки, соответствующей

откольному макроразрушению [1]. Во-вторых, из элементарного рассмотрения процесса отражения треугольного импульса от свободной поверхности следует, что параметр p_c вместе с $\Delta p/\Delta x$ влияет на эффективное время нагружения (расчетное время действия отрицательного давления в плоскости откола). При постоянном $\Delta p/\Delta x$ увеличение p_c приводит к росту времени нагружения. Таким образом, давление в УВ двойственным образом способствует снижению отрицательного давления в плоскости откола: за счет повышения T и увеличения эффективного времени нагружения.

Можно отметить, что результаты по откольному макроразрушению металлов при взрывном нагружении хорошо согласуются с полученными в условиях низкоинтенсивного ударного нагружения. При подобных временных условиях нагружения для Cu и Ni реализуются те же (что и при взрывном нагружении) значения критических отрицательных давлений в плоскости откола [1]. Условия зарождения откольного разрушения, как и в случае ударного нагружения, характеризуются значительно более низкими величинами соответствующего отрицательного давления, что наблюдалось в [10] для меди и свинца. Интересен факт отсутствия явного влияния агрегатного состояния свинца на условия его откольного разрушения при взрывном нагружении. Результат одного из опытов из работы [2] явно относится к откольному разрушению свинца в расплавленном состоянии, однако отклонения от отмеченной тенденции $p_c(\Delta p/\Delta x)$ не наблюдалось. Подтверждают это и результаты, полученные в работе [11]. Здесь для свинца и нескольких других легкоплавких металлов отмечено, что характер разрушения и разлета откольных слоев не зависел от агрегатного состояния металла после разгрузки. Различие проявлялось лишь в том, что откол из расплавленного металла имел более размытые поверхности и на больших базах разлета постепенно терял свою форму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. и др. Проблемы прочности, 1985, 1, 63.
2. Breed V. R., Mader C. L., Vehable D. J. Appl. Phys., 1967, 38, 8, 3271.
3. Johnson J. N. J. Appl. Phys., 1981, 52, 4, 2812.
4. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации.— М.: Мир, 1985.
5. Кондратьев В. Н., Немчинов И. В., Христофоров Б. Д. ПМТФ, 1968, 4, 61.
6. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
7. Gilman J. J., Tuler F. R. J. Fracture Mech., 1970, 6, 2, 169.
8. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
9. Мак-Куин Р. Марш С., Тейлор Дж. и др. // Высокоскоростные ударные явления.— М.: Мир, 1973.
10. Батьков Ю. В., Голубев В. К., Новиков С. А. и др. ФГВ. 1988, 24, 1, 89.
11. Бородулин С. А., Бричков А. И., Волков К. В. и др. ФТТ, 1976, 18, 9, 2814.

г. Москва

Поступила в редакцию 16/XI 1988

УДК 621.039.634 : 539.8 + 621.039.634 : 533.6.013.42

А. И. Белов, В. А. Корнило, В. Е. Клаповский,
А. А. Кузькин, В. Н. Минеев

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОЙ РЕАКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Вопрос об особенностях динамического деформирования оболочек различной геометрии при действии внутреннего взрыва рассматривался в работе [1]. На основе экспериментов определены относительные массы зарядов, вызывающих разрушение цилиндрических и сферических обо-

© 1990 Белов А. И., Корнило В. А., Клаповский В. Е., Кузькин А. А., Минеев В. Н.