

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. М., Поляк Э. Б., Шер Е. Н. О гидродинамическом взаимодействии шнуровых зарядов ВВ.— ПМТФ, 1975, № 5, с. 93—101.
2. Ильинский Н. Б., Лабуткин А. Г., Салимов Р. Б. Об одном случае взрыва симметричного поверхностного заряда переменной толщины.— ПМТФ, 1976, № 3, с. 154—161.
3. Кузнецов В. М. О форме воронки выброса при взрыве на поверхности грунта.— ПМТФ, 1960, № 3, с. 152—156.

УДК 539.42 : 620.173

ОТКОЛЫ В СТАЛИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ВЗРЫВА ЛИСТОВОГО ЗАРЯДА ВВ И УДАРА ПЛАСТИНОЙ

*А. П. Рыбаков**(Челябинск)*

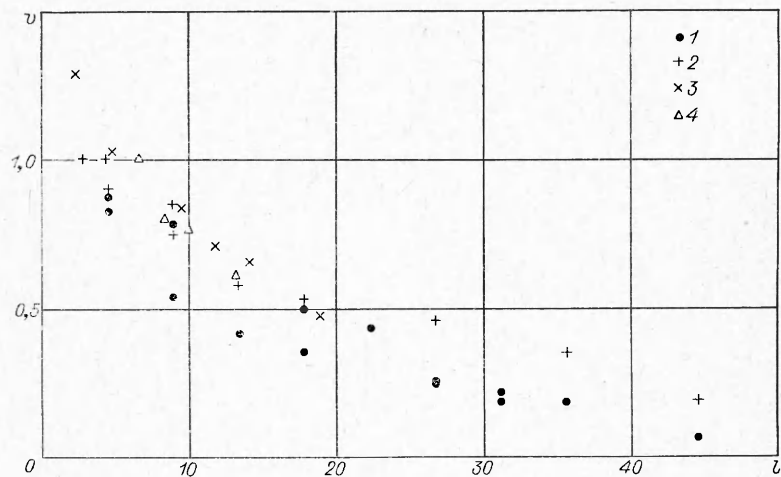
Разрушение специфического вида (откол) возникает, в частности, при сильных ударах или взрывах зарядов взрывчатого вещества (ВВ) на поверхности преград, выполненных из материалов, обладающих конечной прочностью на разрыв. Растягивающие напряжения, вызывающие раскалывание и дробление материала при ударном нагружении, возникают при взаимодействии встречных волн разрежения. Разрушению материала в этом случае всегда предшествует его сжатие в ударной волне и последующее расширение в волнах разрежения.

Исследованию откола посвящено достаточно много работ. Одной из первых в этом направлении является резюмирующая многие из ранних исследований работа [1] с обширным описанием явлений, возникающих в металлах, при воздействии взрывных нагрузок. В частности, довольно подробно описано явление откола, дана качественная картина и сделана попытка экспериментального определения количественной характеристики откола — критического разрушающего напряжения. Последующие исследования (см., например, [1—13]) позволили получить количественные критерии откола и построить схемы для объяснения явления откола с учетом конечного времени разрушения [2] на основе дислокационного механизма разрушения [12] и в квазиакустическом приближении за счет запасенной упругой энергии [13].

При ударном нагружении возможны различные виды приложения нагрузки, например: подрыв блока ВВ, находящегося в контакте с преградой, удар пластиной и подрыв листового заряда ВВ в контакте с испытываемой преградой. При этом реализуются два режима, отличающиеся тем, что плоскость фронта ударной волны, распространяющейся в преграде, либо параллельна свободной поверхности преграды, либо подходит к ней под некоторым углом α . Величину критического разрушающего напряжения определяют по разности начальной w_0 и средней w скоростей движения свободной поверхности

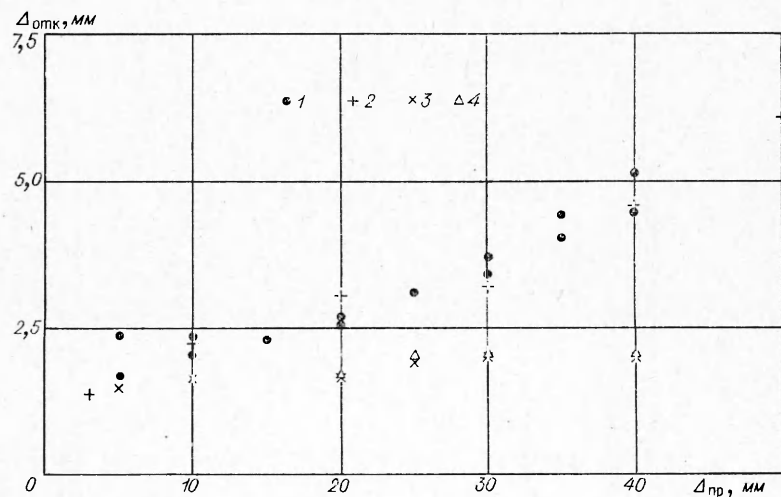
$$(1) \quad p_{кр} = (1/2)\rho_0 c_0 \Delta w,$$

где ρ_0 и c_0 — значения плотности и скорости звука в разгруженном материале. В случае «нормального» падения ударной волны на свободную поверхность преграды $\Delta w = w_0 - \bar{w}$ [2], а при выходе ударной волны под углом к свободной поверхности $\Delta w = w_0 - w/\cos\alpha$ [7, 8].



Ф и г. 1

В данной работе экспериментально исследовано воздействие взрыва листовых зарядов ВВ и удара пластин на преграды из Ст. 3 и проведено измерение толщин и скоростей \bar{w} образующихся при этом отколов. Иницирование листового заряда ВВ, находящегося в контакте с преградой, осуществлено таким образом, чтобы на преграду действовала нагрузка, бегущая со скоростью детонации. Использован литой сплав тротил + гексоген 50/50. Заряды изготавливались в виде пластин $80 \times 150 \text{ мм}^2$ с толщиной 3 и 5 мм. В экспериментах с нагружением путем удара пластиной по преграде использованы стальные пластины толщиной 1,06 и 1,52 мм со скоростями удара 0,96 и 0,65 км/с соответственно. Разгон пластины осуществлялся под действием продуктов взрыва листового заряда ВВ. Скорости пластин измерены в отдельных экспериментах электроконтактным и оптическим методами. Преграды изготавливались в виде дисков толщиной от 3 до 50 мм. Диски толщиной до 20 мм имели диаметр 120 мм, свыше 20 мм — 150 мм. Скорость \bar{w} образующегося откола измерена на базе 3 мм



Ф и г. 2

с помощью электроконтактного метода. В каждом опыте проводилось улавливание откольной тарелочки и последующее определение толщины откола, как и ранее в [7]. Среднеквадратичная ошибка измерения толщины откола 0,1 мм и скорости откола 0,015 км/с. Результаты опытов представлены на фиг. 1, 2.

На фиг. 1 изображена зависимость толщины откола от толщины преграды, на фиг. 2 — зависимость скорости откола от толщины преграды в безразмерных координатах. Безразмерная скорость v есть отношение экспериментально зафиксированной \bar{w} к величине массовой скорости отколы на контактной границе нагружения, безразмерная толщина l — отношение пути, пройденного ударной волной в преграде, к толщине листового заряда ВВ при подрыве последнего в контакте с преградой либо к удвоенной толщине пластины при нагружении преграды путем удара пластин. На фиг. 1, 2 цифра l соответствует нагружению с помощью листового заряда ВВ толщиной в 3 мм, 2 — 5 мм, 3 — нагружению путем удара пластины толщиной 1,06 мм, 4 — 1,52 мм.

Критические разрушающие напряжения найдены по формуле (4). Необходимые при этом значения скорости определены следующим образом. При нагружении путем подрыва листового заряда ВВ значения w_0 взяты

Условия нагружения				Источник	$\rho_{кр}$, кг/мм ²			$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹
					Сталь	Медь	Алюминий	
Подрыв блоков ВВ в контакте с преградой								
Диаметр заряда ВВ, мм	Высота заряда ВВ, мм	Толщина преграды, мм						
Размеры не оговорены				[1,11]	112	287	98	$\sim 10^5$
120	40	20—40	[2]	215	365	110		
20	25—36	30—60	[4]	245		145		
Подрыв листового заряда ВВ в контакте с преградой								
	0.5—5	3—15	[7]			160 ± 12	$\sim 10^6$	
	3—5	8—10	[8]			112 ± 19		
	3—5	5	[8]		378 ± 9			
	3—5	5—20	[8]	245 ± 15				
	3—5	3—50	данные настоящей работы	257 ± 18				
Удар пластиной								
Материал	Толщина, мм	Скорость удара, км/с	Толщина образца, мм					
пластины								
Медь	5	2,4	24	[9]		1500	$\sim 10^7$	
»	2	2,6	10	[2]		780		
Сталь	1,06	0,96	5—40	данные настоящей работы	815 ± 47			
»	1,52	0,65	5—40		750 ± 46			

из работы [8] по экспериментальной зависимости скорости w_0 от толщины стальной преграды. При нагружении с помощью удара пластин значения w_0 получены расчетным путем с учетом затухания ударной волны за счет разгрузки, приходящей с тыльной стороны пластины ударника: подрыв листового заряда ВВ толщиной 3—5 мм — $p_{кр} = 257 \pm 18$ кг/мм²; удар пластиной при $\Delta = 1,06$ мм, $w = 0,96$ км/с — $p_{кр} = 815 \pm 47$ кг/мм²; при $\Delta = 1,52$ мм, $w = 0,65$ км/с — $p_{кр} = 750 \pm 46$ кг/мм².

Разрушающее напряжение при разрыве не является постоянной характеристикой материала. В статических испытаниях [14, 15] установлено, что величина разрывающего напряжения определяется временем действия растягивающего усилия. При динамическом разрыве, каким является откол, критическое разрушающее напряжение также не остается постоянной величиной. На это обращено внимание в работах [3, 12]. Формальная схема явления откола, основанная на зависимости времени разрушения от величины максимальных отрицательных давлений, изложена в [3], в [12] зависимость напряжения разрыва от скорости изменения напряжения объяснена с помощью дислокационного механизма.

Таблица, где сравниваются данные по отколам при различных способах нагружения настоящей работы и данные других работ, наряду с довольно хорошим совпадением результатов, полученных в близких по постановке опытах, демонстрирует (особенно на примере стали и меди) сильную зависимость $p_{кр}$ от условий нагружения, от скорости деформирования ϵ . Скорость деформирования ϵ при взаимодействии волн разрежения, приводящем к отколу, определяется градиентом массовой скорости u ($\epsilon = du/dx|_t$) [2, 3]. Из простых оценок [3] следует, что при взрывах зарядов ВВ из сплава ТГ 50/50 высотой 40—50 мм на поверхности образцов толщиной 10—40 мм $\epsilon \sim 10^5$ с⁻¹. При уменьшении толщины заряда ВВ до 3—5 мм ϵ возрастает до $\sim 10^6$ с⁻¹. В случае удара тонкой пластиной скорость деформирования увеличивается до $\sim 10^7$ с⁻¹. Например, при ударе стальной пластиной толщиной 1,52 мм со скоростью 0,65 км/с по стальной преграде толщиной 5 мм скорость деформирования в зоне взаимодействия волн разрежения равна $1,94 \cdot 10^7$ с⁻¹. Из таблицы на примере стали и меди видно, что увеличение скорости деформирования на два порядка от $\sim 10^5$ до $\sim 10^7$ с⁻¹ приводит к возрастанию $p_{кр}$ в 2,5—3 раза.

Поступила 3 II 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Райнхарт Дж. С., Пирсон Дж. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. М., ИЛ, 1952.
2. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении. — ФММ, 1966, т. 21, № 4.
3. Альтшулер В. А., Новиков С. А., Дивнов И. И. Связь критических разрушающих напряжений со временем разрушения при взрывном разрушении металлов. — «Докл. АН СССР», 1966, т. 166, № 1.
4. Витман Ф. Ф., Иванов М. П., Иоффе Б. С. Сопротивление разрушению пластичных металлов при импульсном нагружении. — ФММ, 1964, т. 18, № 5.
5. Иванов А. Г., Новиков С. А. Об ударных волнах разрежения в железе и стали. — ЖЭТФ, 1961, т. 40, № 6.
6. Иванов А. Г., Новиков С. А., Тарасов Ю. И. Откольные явления в железе и стали, вызванные взаимодействием ударных волн разрежения. — ФТТ, 1962, т. 4, № 1.
7. Ментшов Е. В., Ратников В. П., Рыбаков А. И., Ткаченко А. П., Шавков В. П. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину. — ФГВ, 1967, т. 3, № 2.

8. Рыбаков А. П., Ментешов Е. В., Шавков В. П. Действие взрыва листового заряда ВВ на металлические пластины.— ФГВ, 1968, т. 4, № 1.
9. McQueen R. G., Marsh S. P. Ultimate yield strength of copper.— «J. Appl. Phys.», 1962, vol. 33, N 2.
10. Бутчер Б. М., Баркер А. М., Мансон Д. И., Ландерген С. Д. Влияние предистории напряженного состояния на нестационарный откол в металлах.— «Ракет. техн. и космонавтика», 1964, № 6.
11. Райнхарт Дж. С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов. М., «Мир», 1966.
12. Скидмор И. С. Ударные волны в твердых телах.— Сб. пер. Механика, 1968, № 4.
13. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении.— ФГВ, 1975, т. 11, № 3.
14. Слудкер А. И. Прочность и время.— «Природа», 1965, № 8.
15. Бетехтин В. И., Журков С. П. Временная и температурная зависимость прочности твердых тел.— «Проблемы прочности», 1974, т. 3, № 2.

УДК 624.074.4

ВЫПУЧИВАНИЕ УПРУГИХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ИНТЕНСИВНОМ НАГРУЖЕНИИ

А. В. Маркин

(Новосибирск)

Стержень, на который действует постоянная интенсивная нагрузка [1], можно заменить системой с одной степенью свободы, если движение изучается на достаточно большом отрезке времени [2]. При рассмотрении движения под действием аperiодической интенсивной нагрузки стержень аппроксимируется системой с большим числом степеней свободы [3].

Процесс выпучивания упругого однородного стержня при переменном интенсивном нагружении описывается уравнением

$$(1) \quad EIw_{xxxx} + N(t)w_{xx} + \rho Fw_{tt} = f(x), \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0,$$

где w — нормальный прогиб; x и t — продольная координата и время; L — длина стержня; ρ — плотность материала стержня; F и I — постоянная площадь поперечного сечения и изгибная жесткость стержня; E — модуль Юнга; $N(t)$ — заданная переменная продольная сила (фиг. 1); $f(x)$ — функция, определяемая заданными малыми возмущениями или несовершенствами.

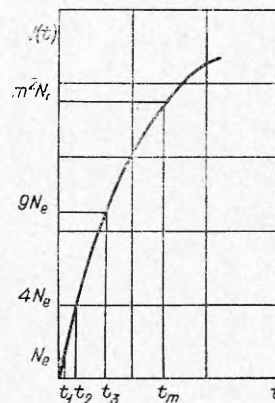
Заданная продольная сила $N(t)$ является непрерывной монотонно возрастающей функцией времени. Она возрастает от нуля и пробегает последовательно значения, равные критическим значениям статической задачи $N(t) = m^2 N_e$, $N_e = \pi^2 EIL^{-2}$ ($m = 1, 2, \dots$).

Предположим, что шарнирно-опертый стержень до нагружения находился в покое. Тогда начальные и граничные условия примут вид

$$(2) \quad w = w_t = 0 \quad (t=0, \quad 0 \leq x \leq L), \quad w = w_{xx} = 0 \quad (x = 0, L, \quad t > 0).$$

Решение задачи (1), (2) разыскивается в виде ряда

$$(3) \quad w = \sum_{m=1}^{\infty} q_m(t) \sin \frac{m\pi x}{L}.$$



Ф и г. 1