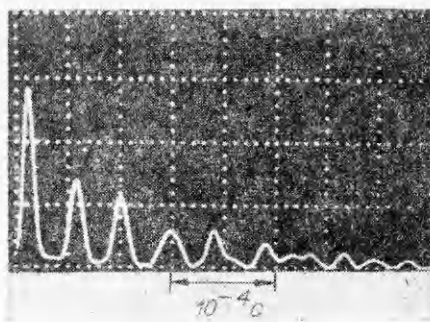


Фиг. 3



Фиг. 4

$F_1 - F_4$ равны амплитудам импульсов от первых четырех солитонов. Относительная ошибка измерения для значений $F_1 - F_4$ не превышает 17%, для временных интервалов $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{14} - 7\%$.

Из сравнения фиг. 1, 3 и данных таблицы видно, что существует качественное и количественное согласие между амплитудами уединенных волн, их числом и временными параметрами при $N = 20$. При $N = 40$ в эксперименте наблюдается качественная картина, полностью аналогичная численному счету (см. фиг. 2 и 4), но амплитуды уединенных волн (F_1, F_2) в опытах существенно меньше теоретических (см. таблицу) из-за наличия диссипативных процессов, не учитываемых в расчете. Вследствие этого в данном случае наблюдается также значительная разница во временных интервалах $\tau_{12} - \tau_{14}$.

Таким образом, в экспериментах обнаружены уединенные волны нового типа, согласующиеся с численными расчетами дискретной цепочки частиц.

Рассмотренный пример является единственным известным нам случаем наблюдения уединенных волн, когда скорость распространения в системе длинноволновых звуковых возмущений равна нулю. Солитоны в этом случае выполняют роль элементарных стационарных возбуждений.

Авторы благодарят П. Г. Анникову за помощь в проведении численных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко В. Ф. Распространение нелинейных импульсов сжатия в зернистых средах. — ПМТФ, 1983, № 5.
2. Узем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

Поступила 11/IV 1984 г.

УДК 399.374.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

В. В. Селиванов

(Москва)

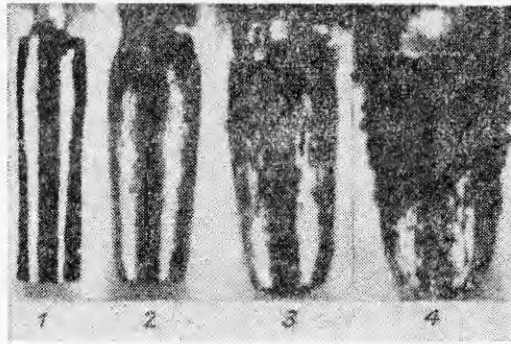
Вопрос о предельных деформациях цилиндрических оболочек, расширяющихся под действием продуктов детонации (ПД) конденсированных взрывчатых веществ (КВВ), обсуждался в [1—4]. Реализация критериев разрушения [2, 5] применительно к жесткопластическим цилиндрическим оболочкам рассмотрена в [4].

Простейшая оценка влияния масштабного фактора на радиус разрушения оболочки, нагружаемой импульсом давления и запаасающей некоторую упругую энергию, целиком затрачиваемую на разрушение, приведена в [6]. Модификация данного подхода, учитывающая динамику процесса нагружения оболочки, ее толщину, пластические свойства материала обо-

Лочки, тип нагружающего КВВ и наличие переменной по толщине зоны растягивающих напряжений по мере расширения оболочки под действием ПД, может быть осуществлена с применением зависимости Тейлора [1]

$$(1) \quad y = \delta Y / p,$$

где y — толщина растянутой зоны, отсчитываемая от внешней поверхности оболочки; δ — текущая толщина оболочки; Y — динамический предел текучести материала оболочки; $p = p_0(a_0/a)^{2k}$ — текущее давление на внутренней поверхности оболочки; $p_0 = \rho_0 D^2 / 2(k+1)$ — давление мгновенной детонации; ρ_0 — плотность КВВ; D — скорость детонации; k — показатель изэнтропы ПД; a_0 и a — начальный и текущий внутренние радиусы оболочки.



Ф и г. 1

Взрывной нагрузке подвергались длинные цилиндрические оболочки ($L_0/a_0 > 12$, L_0 — длина оболочки), внутренняя полость которых заполнена зарядом КВВ, инициируемым в точке симметрии торцевой поверхности. С помощью высокоскоростной оптической съемки определялись значения относительного внешнего радиуса разрушения b_f/b_0 (b_0 — начальный внешний радиус оболочки, b_f — радиус разрушения), фиксируемого по прорыву ПД на внешнюю поверхность. Некоторые результаты эксперимента для среднеуглеродистой стали представлены на фиг. 1 в последовательные моменты времени: 1 — $t = 11,2$; 2 — $22,4$; 3 — $28,8$; 4 — $35,2$ мкс.

Будем считать, что развитие разрушения есть распространение трещин отрыва. Так как разгрузке может подвергаться только растянутая зона, расходуемая запасенную энергию на разрушение, то запас этой энергии равен величине

$$(2) \quad E_1 = A \varepsilon_1 \frac{2b-y}{2} y L_0,$$

где ε_1 — удельная объемная энергия в растянутой зоне, расходуемая на разрушение (развитие трещин отрыва); $(2b-y)/2 = R_y$ — средний радиус зоны растяжения; $A = \text{const}$.

С учетом (1) зависимость (2) имеет вид

$$E_1 = A \frac{Y}{p} \delta b L_0 \left(1 - \frac{y}{2b}\right) \varepsilon_1.$$

Кроме того, $\varepsilon_1 \sim Y^2/E$ и $Y \sim (\varepsilon_1 E)^{1/2}$, т. е. $\varepsilon_1 Y \sim \varepsilon_1^{3/2} E^{1/2} = B$, и тогда

$$(3) \quad E_1 = \frac{C}{p} \delta b L_0 \left(1 - \frac{y}{2b}\right),$$

где $C = AB = \text{const}$.

Для разрушения материала необходима энергия

$$(4) \quad E_2 = K \varepsilon_2 \delta L_0,$$

где ε_2 — энергия разрушения, затрачиваемая при образовании единичной площади свободной поверхности; $K = \text{const}$.

Предполагая, что вся запасенная энергия E_1 затрачивается на разрушение ($E_2 = E_1$), в соответствии с (3) и (4) имеем

$$\dot{b}_f = \frac{K}{C} \frac{\varepsilon_2 p}{1 - y/2b_f}.$$

Так как $y/2b_f \ll 1$ — малый параметр, то $1/(1 - y/2b_f) \simeq 1 + y/2b_f \simeq 1$ и

$$\frac{b_f}{b_0} \simeq \frac{K \varepsilon_2 p}{C b_0}.$$

В качестве величины ε_2 можно принять какую-либо из характеристик разрушения материала (G_{1c} , J_{1c} , a_H и т. д.). Пусть $\varepsilon_2 = a_H$, a_H — ударная вязкость материала. Учитывая также, что $b_0 = a_0/(1 - 2\delta_d)$, $p = \rho_0 D^2 (a_0/a)^{2k} / 2(k + 1)$, получим

$$(5) \quad \frac{b_f}{b_0} \simeq N \frac{a_H}{a_0} (1 - 2\delta_d) \rho_0 D^2 \left(\frac{a_0}{a_f} \right)^{2k},$$

где $\delta_d = \delta_0/2b_0$ — относительная толщина стенки оболочки; δ_0 — начальная толщина стенки; $N = k/2C(k + 1) = \text{const}$.

Кроме того,

$$\left(\frac{a_0}{a_f} \right)^{2k} = \left[\frac{b_0 (1 - 2\delta_d)}{b_f (1 - 2\delta_{df})} \right]^{2k},$$

где $(1 - 2\delta_d)/(1 - 2\delta_{df}) = 1 - 2(\delta_d - \delta_{df})/(1 - 2\delta_{df})$; $\delta_{df} = \delta/2b_f$ — относительная толщина стенки оболочки в момент разрушения.

В соответствии с экспериментальными данными $0,1 < \delta_{df} < \delta_d$, т. е. $\delta_d - \delta_{df} \simeq 0,05$ и $(1 - 2\delta_d)/(1 - 2\delta_{df}) \approx 1$ с точностью до 12%. Тогда (5) имеет вид

$$\left(\frac{b_f}{b_0} \right)^{1+2k} \simeq N \frac{a_H}{a_0} (1 - 2\delta_d) \rho_0 D^2$$

или

$$(6) \quad \frac{b_f}{b_0} \simeq \left[N \frac{a_H}{a_0} (1 - 2\delta_d) \rho_0 D^2 \right]^{1/(1+2k)}.$$

Так как при выводе соотношения (6) не были учтены процессы сдвигового разрушения, влияние разрушения отрывом на напряженно-деформированное состояние, влияние ударных волн, волн сжатия и разрежения и их взаимодействие, то степени сомножителей в правой части (6) должны быть определены по экспериментальным данным, т. е.

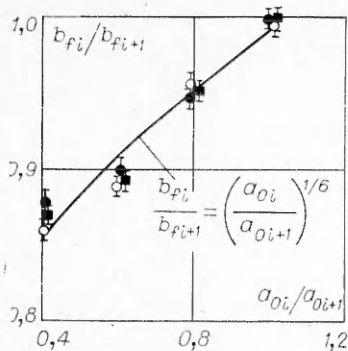
$$(7) \quad \frac{b_f}{b_0} \sim \left(\frac{a_H}{a_0} \right)^\alpha (1 - 2\delta_d)^\beta (\rho_0 D^2)^\gamma.$$

Обработка результатов многофакторного эксперимента, проведенного на 52 стальных удлиненных цилиндрах, приводит к зависимостям

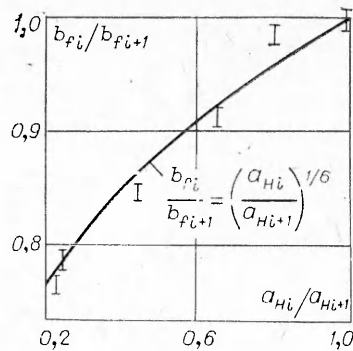
$$(8) \quad b_f/b_0 \sim (1/a_0)^{1/6}, \quad b_f/b_0 \sim (a_H)^{1/6}, \quad b_f/b_0 \sim (\sqrt{\rho_0 D})^{1/2}, \\ b_f/b_0 \sim (1 - 2\delta_d)^{1/2}.$$

На фиг. 2 и 3 в качестве примера показаны результаты экспериментов, подтверждающие первые две зависимости системы пропорциональных соотношений (8). На фиг. 2 нанесены данные экспериментов для стали 20 (кружочки), стали 60 (точки) и стали 45X (квадраты) в нормализованном состоянии. Цилиндрические макеты имели относительную толщину стенки $\delta_d = 0,177$ и нагружались ПД флегматизированного гексогена. Минимальный начальный внутренний радиус оболочки $a_0 = 6,5$ мм, а максимальный 15,5 мм. Обработка результатов каждого эксперимента проводилась по 10 измерениям радиуса разрушения b_f/b_0 для последовательного ряда макетов при условии $a_{0i} \leq a_{0i+1}$, где i — индекс эксперимента.

На фиг. 3 аргументом является ударная вязкость материала цилиндрических оболочек из сталей 60, 45X и 35 с различной термообработкой, нагружаемых ПД состава ТГ 50/50. Внутренний радиус оболочек $a_0 = 10$ мм, относительная толщина стенки $\delta_d = 0,13$, а минимальное зна-



Фиг. 2



Фиг. 3

чение ударной вязкости $a_n \approx 200$ кДж/м². Обработка результатов каждого эксперимента проводилась по 10 измерениям радиуса разрушения для последовательного ряда макетов при условии $a_{Hi} \leq a_{Hi+1}$.

Подстановка системы пропорциональных соотношений (8) в (7) и соответствующее определение коэффициента пропорциональности по методу наименьших квадратов приводят к зависимости

$$(9) \quad b_f/b_0 \approx 0,0019(a_n/a_0)^{1/6}(1 - 2\delta_d)^{1/2}(V\rho_0 D)^{1/2},$$

где a_n в кДж/м²; a_0 — мм; ρ_0 — кг/м³; D — м/с.

Сравнительная оценка величины внешнего радиуса разрушения, найденного в соответствии с (9), по отношению к экспериментальным значениям показывает, что погрешность вычислений не превышает 15% и лежит в пределах ошибки измерений.

Анализ экспериментальных результатов показал, что основными факторами, определяющими предельные деформации (радиус разрушения) стальных цилиндрических оболочек, нагружаемых продуктами детонации КВВ, являются масштабный эффект a_0 , пластичность материала a_n , относительная толщина стенки δ_d и тип нагружающего тела ($\rho_0 D^2$ — величина, пропорциональная детонационному давлению). Полученное соотношение (9) качественно правильно отображает феноменологию процесса, а количественные результаты не противоречат данным экспериментальных исследований и учитывают масштабный эффект при разрушении.

Автор выражает благодарность А. Е. Колобановой за помощь в обработке и обсуждении экспериментальных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Taylor G. I. The fragmentation of tubular bombs. — In: Scientific Papers of G. I. Taylor. Cambridge Univ. Press, 1963, v. 3.
2. Poggatt G. R., Recht R. F. Fracture behaviour of tubular bombs. — J. Appl. Phys., 1968, v. 39, N 3.
3. Одинцов В. А., Селиванов В. В., Чудов Л. А. Расширение идеально пластической цилиндрической оболочки под действием продуктов детонации. — ПМТФ, 1974, № 2.
4. Селиванов В. В. Предельные деформации динамического разрушения цилиндрических оболочек. — ПМТФ, 1982, № 4.
5. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов. М.: Машиностроение, 1968.
6. Иванов А. Г., Минеев В. Н. и др. Пластичность, разрушение и масштабный эффект при взрывном нагружении стальных труб. — ФГВ, 1974, № 4.

Поступила 15/XI 1983 г.