

ОСОБЕННОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО СХОЖДЕНИЯ ОТКОЛЬНЫХ СЛОЕВ В СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ

А. Г. ИВАНОВ, В. Н. СОФРОНОВ, Е. С. ТЮНЬКИН

(Москва)

Процесс безоткольного схождения цилиндрических оболочек вплоть до их полного смыкания исследовался в ряде работ (см., например, [1, 2] и библиографию к ним). Однако в практике взрывного эксперимента нередко возникают условия, приводящие к образованию отколов. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования деформации и откольного разрушения цилиндрических оболочек из стали при их взрывном нагружении и делается попытка их расчетного описания.

Интенсивность нагружения выбрана такой, что энергия, получаемая оболочкой, недостаточна для ее полного смыкания. В опытах использовались оболочки из стали Ст. 3 с наружным диаметром 47,6 мм, толщиной стенки 8,8 мм и длиной 150 мм.

Нагружение осуществлялось скользящей детонационной волной (ДВ), возбуждаемой в заряде взрывчатого вещества (ВВ) типа ТГ 50/50, расположенном непосредственно в наружной поверхности оболочки. ДВ возбуждалась с одного из торцов оболочки одновременно по всей окружности с помощью диска ВВ, инициируемого в центре.

Фотографии сечений сохранившихся оболочек показаны на фиг. 1. В таблице приведены толщины зарядов ВВ Δ , размеры сечений после нагружения (диаметр и толщина стенки), толщина откольного слоя, относительная деформация оболочки ϵ и толщина откольного слоя в момент его образования. Последняя величина определялась в предположении, что откольный слой возникал при отражении первой ударной волны от свободной границы, когда смещения стенки оболочки малы (предположение не противоречит результатам расчетов). Размеры оболочек (см. таблицу) получены в результате усреднения не менее чем 10 измерений.

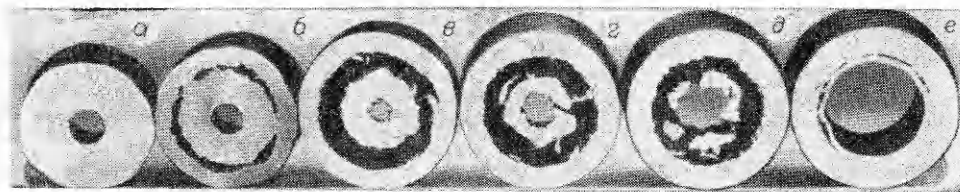
Приведенные на фиг. 1 сечения показывают влияние толщины слоя ВВ на характер откольного разрушения и особенности схождения откольного слоя. Во всех опытах, где толщина слоя ВВ меньше толщины стенки оболочки, образуется откол; безоткольное схождение оболочки наблюдается только в опыте 1 (фиг. 1, а), где толщина слоя ВВ 10 мм.

В опытах 2 и 3 (фиг. 1, б, в, толщина слоя ВВ соответственно 7,5 и 5 мм) откольный слой сходит устойчиво, без разрушения, утолщаясь в 1,5 и 2,3 раза, соответственно достигая деформации 35 и 38,5%.

Уменьшение толщины слоя ВВ до 3 и 2 мм (фиг. 1, г, д) сопровождается разрушением откольного слоя, дроблением его на фрагменты размером $\sim 3 \times 5$ мм вследствие сдвиговых деформаций и, как следствие, потерей устойчивого схождения. Наконец, при толщине слоя ВВ 1 мм (фиг. 1, е) наблюдается начальная стадия образования откола — зарождение магистральной трещины с одновременным возникновением возмущений на откольном слое. Относительная деформация оставшейся стенки оболочки также обнаруживает сильную зависимость от толщины заряда. Так, при изменении толщины заряда в 10 раз (от 1 до 10 мм) ϵ изменяется в 24 раза (от 0,84 до 20,4%), причем эта зависимость линейна в интервале толщин зарядов от 1 до 5 мм, затем наблюдается резкий рост, сопровождающийся развитием изгибных возмущений, которые имеют наибольшую амплитуду ($\Delta r/r \sim 3\%$) в опыте 2, когда при относительно малой толщине оставшейся стенки оболочки величины деформации достаточно велики ($\epsilon \sim 13,7\%$). Число возмущений на оболочке составляет ~ 10 , и возмущения не строго периодичны.

Однако эти особенности схождения в одномерных расчетах естественно не могли быть отражены. Таким образом, в зависимости от соотношения толщины заряда ВВ и оболочки может быть реализовано как безоткольное, так и сопровождающееся откольным разрушением схождение цилиндрических оболочек.

Задача о деформировании цилиндрической оболочки под действием внешнего заряда ВВ решалась численно. Учитывалось движение среды в радиальном направле-



Ф и г. 1

Номер опыта, фигура	Толщина заряда ВВ Δ , мм	Размеры сечения оболочки после опыта, мм	Размеры откольного слоя, мм	Деформация оболочки ϵ , %	Толщина откольного слоя в момент его образования, мм
1 (фиг. 1, а)	10	37,8×13,6	—	20,4	—
2 (фиг. 1, б)	7,5	41×4,9	28×9...10	13,7	6,6
3 (фиг. 1, в)	5	45,7×5,8	23×8...8,5	4,2	3,7
4 (фиг. 1, г)	3	46,3×6,6	24×3...5	2,53	2,5
5 (фиг. 1, д)	2	46,7×7,2	21×3...5	1,68	1,8
6 (фиг. 1, е)	1	47,2×7,5	31×1,5...2	0,84	1,6

нии к оси симметрии. Так как расчет скользящей детонации выходит за рамки одномерной задачи, то в расчетах была задана мгновенная детонация всего слоя ВВ. Разлет продуктов детонации описывался кубическим уравнением состояния с $\rho_0 = 1,51$ г/см³, $D = 7,8$ км/с.

Движение и деформирование оболочек рассчитывалось с учетом ряда эффектов, таких как сжимаемость, упругость, пластичность, разрушение.

В качестве модели среды была выбрана модель вязкоупругого тела Максвелла [3]. Зависимость внутренней энергии и времени релаксации касательных напряжений от параметров среды аппроксимировалась интерполяционными формулами [4, 5]. Для численного решения дифференциальных уравнений использовалась разностная схема Неймана («Крест») с искусственной вязкостью.

Явление откола описывалось так же, как в [6]. За критерий откола было выбрано равенство запаса упругой энергии в зоне растяжения, энергии E_λ , идущей на образование новой поверхности:

$$2\pi \int_{r_n}^{r_k} E_{упр} \rho r dr = 2\pi r_{от} E_\lambda,$$

где r_n , r_k — радиусы границы зоны растяжения; $r_{от}$ — радиус, на котором образуется откол. Значение E_λ взято равным 0,09 Дж/мм². Упругая энергия состояла из двух слагаемых — упругой энергии изменения объема и упругой энергии изменения формы:

$$E_{упр} = (1/2) [c_0^2 - (4/3) b_0^2] (\delta - 1)^2 l_0 (\delta) + 2b_0^2 l_1 (\delta) D.$$

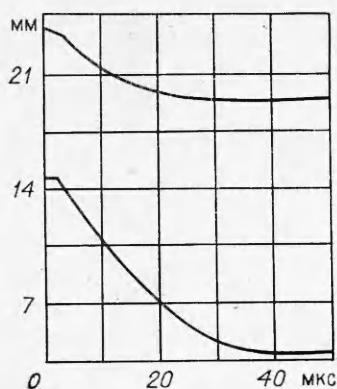
Здесь использованы обозначения [5].

Решено 2 задачи. При заданных размерах стальной оболочки ($\varnothing 47,6 \times 8,8$ мм) варьировалась толщина слоя ВВ. В первом расчете $\Delta = 10$ мм, во втором $\Delta = 5$ мм.

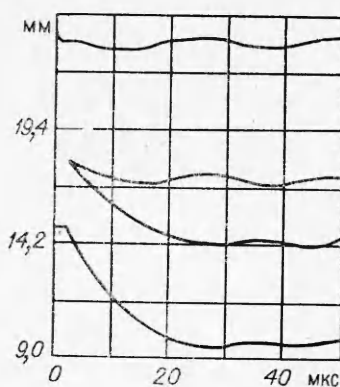
В процессе счета скорректировано значение параметра q , входящего в выражение для времени релаксации и характеризующего соотношение между сдвиговыми и упругими напряжениями. Расчеты проводились с $q = 0,6 \cdot 10^4$ вместо $q = 2,6 \cdot 10^4$ [5], что увеличивает вклад упругих напряжений. Это изменение параметра q связано с тем обстоятельством, что в [5] не указана конкретная марка стали, для которой даны значения параметров. Поэтому, чтобы понять влияние перехода от одного типа стали к другому, проведен сравнительный опыт на армко-железе при толщине заряда ВВ, равной 10 мм. Было обнаружено, что в отличие от опыта 1 с Ст. 3, где оболочка не сомкнулась, в опыте с армко-железом зарегистрировано полное смыкание ее. Этот эффект учтен вариацией величины q в предварительных расчетах.

На фиг. 2 приведена r, t -диаграмма схождения оболочек при нагружении зарядом ВВ толщиной 10 мм. При $t = 0$ начинает движение наружная граница оболочки, а через $\sim 1,6$ мкс — внутренняя. Движение границ происходит с замедлением, и на 35-й микросекунде происходит остановка. Конечный радиус остановки внутренней границы составляет 4,9 мм, что близко к эксперименту. Начальные скорости движения границ составляют 190 и 520 м/с (наружной и внутренней соответственно), что также близко к значению, получаемому по величине начального импульса ВВ.

Схождение оболочки сопровождается ростом температуры. Повышение температуры в ударной волне составляет ~ 35 , а максимум ~ 700 К.



Ф и г. 2



Ф и г. 3

Кинетическая энергия оболочки достигает максимума через 4 мкс после начала движения, а через 35 мкс вся кинетическая энергия переходит в тепловую, практически равную полной энергии.

На фиг. 3 представлена r, t -диаграмма движения оболочки при нагружении зарядом ВВ толщиной 5 мм. Как видно из r, t -диаграммы, через 2,6 мкс на радиусе 18 мм образуется откол толщиной ~ 3 мм, который сходится к центру, утолщаясь до $\sim 4,7$ мм. Оставшаяся стенка оболочки практически не смещается, но колеблется вблизи начального положения. Повышение температуры в ударной волне также составляет ~ 35 К, однако конечная температура несколько ниже (~ 500 К) по сравнению с предыдущим опытом вследствие меньшей начальной скорости движения оболочки.

Таким образом, предложенная модель позволяет качественно, а по некоторым параметрам и количественно описать процесс схождения цилиндрической оболочки. Некоторые расхождения с экспериментом (по толщине откола и отсутствию деформации наружной границы оболочки), по-видимому, могут быть устранены соответствующим выбором счетных параметров.

Поступила 15 IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. О некоторых эффектах, возникающих при взрывном обжатии вязкой цилиндрической оболочки. — ПМТФ, 1978, № 3.
2. Иванов А. Г., Минеев В. Н., Тюнькин Е. С. Импульсное схлопывание стальных цилиндрических оболочек. — Изв. АН СССР. МТТ, 1982, № 2.
3. Годунов С. К. Элементы механики сплошной среды. М.: Наука, 1978.
4. Годунов С. К., Козин Н. С., Роменский Е. И. Уравнение состояния упругой энергии металлов при нешаровом тензоре деформаций. — ПМТФ, 1974, № 2.
5. Годунов С. К., Денисенко В. В. и др. Применение релаксационной модели вязкоупругости при расчете одноосных однородных деформаций и уточнение интерполяционных формул максвелловской вязкости. — ПМТФ, 1979, № 5.
6. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении. — ФГВ, 1975, № 3.

УДК 620.178.7

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОБОЛОЧЕК ВЗРЫВНЫХ КАМЕР

А. И. АБАКУМОВ, В. В. ЕГУНОВ, А. Г. ИВАНОВ,
А. А. УЧАЕВ, В. И. ЦЫПКИН, А. Т. ШИТОВ

(Москва)

В экспериментальных исследованиях по импульсному нагружению взрывных камер отмечается явление циклического повышения амплитуд деформаций с течением времени [1, 2]. Это явление связано с взаимодействием некоторых изгибных форм колебаний камеры, называемых критическими, с мембранными формами, что приводит к неустойчивому состоянию, в результате которого наблюдается циклический процесс перекачки энергии мембранных форм в изгибные. Возбуждение изгибных форм колебаний во взрывной камере происходит за счет различного рода конструктивных элементов (патрубки, опорные плиты для приборов, сварные швы и т. д.), а также несовершенств в виде отклонений геометрических и механических характеристик.