

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., Бричиков 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.

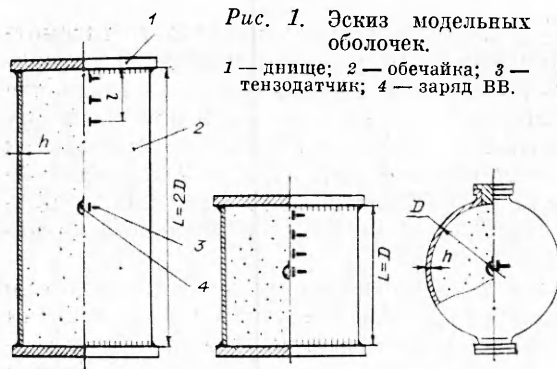


Рис. 1. Эскиз модельных оболочек.

1 — днище; 2 — обечайка; 3 — тензодатчик; 4 — заряд ВВ.

лочек. Сделан вывод о том, что цилиндрические оболочки не менее прочны, чем сферические, и их разрушение носит менее катастрофический характер. Этот вывод нетривиален, поскольку при действии внутреннего статического давления предельная нагрузка для цилиндрических оболочек в 2 раза меньше по отношению к сферическим.

Потребности практики не исчерпываются анализом поведения конструкций в области предельных состояний. Так, при решении вопроса о выборе геометрии оболочек контейнеров, предназначенных для локализации многократных взрывных процессов, не могут быть использованы результаты [1], поскольку в конструкциях такого назначения реакцию оболочек определяют процессы возбуждения и взаимодействия упругих колебаний. При этом, как следует, например, из [2], в отличие от пластически деформируемых оболочек, максимальные деформации могут возникать не только в стадии нагружения, но и в стадии свободных колебаний.

Исследование упругих откликов сферических и цилиндрических оболочек для типичного случая нагружения центральным взрывом сосредоточенных зарядов — цель настоящей работы. В экспериментах использованы модельные оболочки с диаметром срединной поверхности $D = 440$ мм и толщиной стенки $h = 10$ мм. Цилиндрические оболочки с плоскими днищами толщиной 25 мм выполнены в двух вариантах — длиной $L = D$ и $L = 2D$. Заделка краев оболочки конструктивно соответствовала схеме жесткого защемления. Сферическая оболочка из стали 30ХГСА снабжена двумя идентичными патрубками с внутренним диаметром 60 мм, расположенными в полюсных зонах. Материал цилиндрических оболочек Х18Н10Т. Различие материалов представляется несущественным фактором для процессов, протекающих в упругой области, поскольку значения упругих констант и плотности различных марок сталей близки.

Оболочки нагружались взрывом шаровых зарядов из состава ТГ 50/50 массой 55 г, установленных в центре заполненных воздухом полостей камер. В экспериментах измерены деформации внешних поверхностей оболочек (схема размещения тензодатчиков приведена на рис. 1) и динамические давления на внутренних поверхностях пьезодатчиком, который устанавливался в центре обечайки цилиндрической и на экваторе сферической оболочки. Поведение днищ не рассматривалось, так как, по мнению авторов [3], частично обоснованному представленными в статье результатами, исследование реакции днищ может быть выделено в самостоятельную задачу. Методика измерений аналогична изложенной в [4].

Измерения показали, что пиковые давления на фронте головной отраженной ударной волны (УВ) в указанных точках поверхности сферической и цилиндрической оболочек близки и составляют ~ 21 МПа, профили $p(t)$ имеют сходный вид (рис. 2). Основное различие нагрузок — меньшая длительность воздействия головного импульса в цилиндрических оболочках по сравнению со сферической (соответственно ~ 70 и 110 мкс), что можно объяснить эффектом боковой разгрузки отраженной УВ в центре цилиндра. Аналогичные особенности отмечены и во вторичных УВ.

Данные по распределению амплитуд интенсивностей напряжений (в ГПа) вдоль образующей цилиндрических оболочек приведены в таблице и на рис. 3, для сферической оболочки — на рис. 4. Интенсивности напряжений определены как $\sigma_i = (\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_1\sigma_2)^{0.5}$. Компоненты напряже-

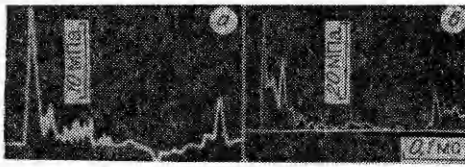


Рис. 2. Осциллограммы давления на внутренней поверхности цилиндрической (а) и сферической (б) оболочек.

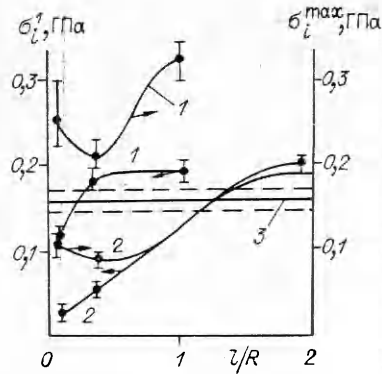


Рис. 3. Распределение амплитуд интенсивностей напряжений по образующей цилиндрических оболочек в первом полупериоде колебаний и максимальных за историю колебаний.

1 — цилиндр $L = D$; 2 — цилиндр $L = 2D$; 3 — сфера (экватор).

ний вычислялись на основе соотношений Гука для плоского напряженно-деформированного состояния $\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_1 + \nu\epsilon_2)$, $\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_2 + \nu\epsilon_1)$.

Наиболее интересно в рамках поставленной задачи поведение областей, удаленных от зон краевых эффектов: в точках экватора сферической и в центре цилиндрической оболочек. В связи с этим ниже в основном анализируются результаты, полученные для этих областей.

В начальный период времени ($\leq 1/4 T_0$) максимальные амплитуды интенсивностей напряжений σ_i^1 возникают в центре цилиндра. Уровни σ_i^1 в этих зонах для обоих вариантов длин оболочек одинаковы. На экваторе сферы амплитуда σ_i^1 ниже этих значений на $\sim 35\%$. Деформированные состояния в центральном сечении цилиндра в течение $1/4 T_0$ близки к одноосным (рис. 5). Превалируют кольцевые деформации, осевые компоненты в ~ 7 раз ниже. При этом в большинстве экспериментов в момент достижения кольцевыми деформациями ϵ_φ пиковых значений осевая компонента ϵ_z имела отрицательный знак (деформации сжатия), в отдельных случаях $\epsilon_z \approx 0$. Приведенные в таблице величины осевых компонент σ_z^1 определены именно для этих моментов времени и не являются амплитудными значениями осевых напряжений, так как амплитуды кольцевых и осевых деформаций в исследованных оболочках достигаются одновременно (см. рис. 5). В сферической оболочке амплитуды широтной и меридиональной компонент близки по величине и реализуются синхронно.

В последующих стадиях колебаний в поведении цилиндрических оболочек разной длины имеется существенное качественное отличие (рис. 6, а). В центре оболочки с $L/D = 2$ максимальные амплитуды коль-

L/R	L/D	$\sigma_\varphi^1 \cdot 10^2$	$\sigma_z^1 \cdot 10^2$	$\sigma_\varphi^{\max} \cdot 10^2$	$\sigma_z^{\max} \cdot 10^2$	$\sigma_i^1 \cdot 10^2$	$\sigma_i^{\max} \cdot 10^2$	$\sigma_i^{\max} / \sigma_i^1$
0,09	1	13,7±0,7	4,7±2,1	27,8±2,6	26,2±4,5	12,6±1,2	27,1±3,6	2,15
	2	2,5±0,8	1,4±0,9	13,1±1,7	8,2±4,5	2,8±0,85	12,0±1,4	4,3
0,37	1	19,5±1,4	1,5±0,5	25,1±2,5	5,5±2,8	18,9±1,1	22,9±2,0	1,2
	2	5,6±0,7	1,58±0,5	11,4±1,0	2,4±1,8	5,4±0,7	10,9±1,1	2,0
Сфера (экватор)	1	20,7±1,9	5,1±2,9	38,4±3,0	14,2±4,2	19,2±1,4	33,8±2,4	1,76
	2	22,7±1,5	5,2±1,6	22,7±1,5	5,1±2,1	20,6±1,2	20,6±1,2	1
	3	15,2±3,4	15,2±3,4	17,1±1,4	17,1±1,4	15,2±3,4	17,1±1,4	1,12

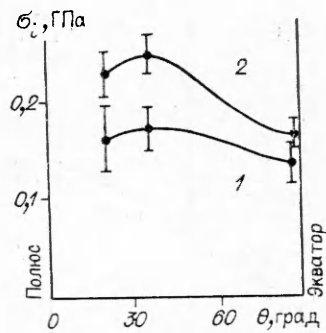


Рис. 4. Распределение амплитуд интенсивностей напряжений по меридиану сферической оболочки. 1 — в первом полупериоде; 2 — максимальных.

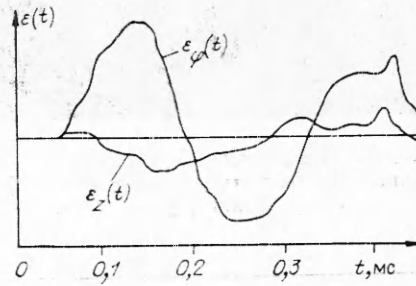


Рис. 5. Осциллограммы компонент деформаций в центральном сечении цилиндрических оболочек. 1, 4 — $L = 2D$, 2, 3 — $L = D$.

цевых деформаций реализуются в первом полупериоде, наблюдаемое нарушение монотонности затухания колебаний не приводит к раскачке колебаний [2]. В соответствующей области оболочки с $L/D = 1$ зарегистрировано неперриодическое нарастание амплитуд колебаний, отношение максимальной амплитуды интенсивности напряжений к начальной $\sigma_i^{\max}/\sigma_i^1 \approx 1,6$. Положение максимума $\sigma_i^{\max}(l)$, как и в ранних стадиях процесса, соответствует центральной области оболочки. На экваторе сферы раскачка незначительна ($\sigma_i^{\max}/\sigma_i^1 = 1,3$).

Различие амплитуд σ_i^{\max} в сферической и цилиндрической оболочке с $L/D = 2$ составляет $\sim 10\%$. Соотнести реакции и сформулировать выводы общего характера относительно поведения сферических и цилиндрических оболочек в стадии свободных колебаний затруднительно, поскольку эти процессы в существенной степени зависят от индивидуальных особенностей конструкций.

Процессы колебаний во всех зонах цилиндрических оболочек, за исключением окрестностей заземленных торцов, почти гармонические. Основная частота близка к частоте свободных радиальных колебаний бесконечной круговой цилиндрической оболочки $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{E}{2\pi\rho}}$ (в эксперименте $f_0 = 3,6$ кГц, теоретическое значение для $E = 2,1 \cdot 10^{12}$ ГПа и $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/см³ составляет $f_0' = 3,9$ кГц). Отсутствие периодичности нарастания амплитуды колебаний в оболочке с $L/D = 1$, по-видимому, есть следствие возбуждения на фоне основной нескольких форм колебаний, амплитуды которых соизмеримы с амплитудой центрально-симметричной, а частоты близки к ω_0 . Вблизи заземленных краев оболочек колебательные процессы (рис. 6, б) характеризуются наличием в спектре двух форм с сильно различающимися частотами. При $L/D = 1$ преобладают амплитуды низкочастотных колебаний с $\omega \approx 0,1\omega_0$, в случае $L/D = 2$ —

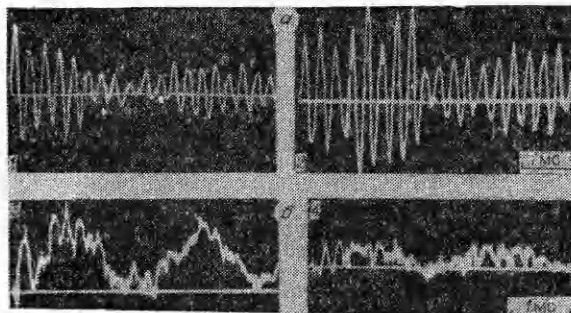


Рис. 6. Осциллограммы кольцевых деформаций в центре (а) и в окрестности заземленных краев цилиндрических оболочек (б), ($l/R = 0,093$). 1, 4 — $L = 2D$; 2, 3 — $L = D$.

амплитуды низкочастотной и основной форм сравнимы. Особенности колебаний сферической оболочки с параметрами, идентичными исследованной, подробно описаны в [4].

Подводя итог результатам исследований, можно сделать следующие выводы. При нагрузках, вызванных внутренним центральным взрывом в воздухе сферического заряда одинаковой массы, в замкнутой цилиндрической оболочке амплитуда интенсивностей напряжений в первом полу-периоде колебаний превышает значение этого параметра в идеальной сферической оболочке с одинаковыми характерными размерами на $\sim 35\%$, что указывает на возможность использования для оценки амплитуд интенсивностей напряжений σ_1 цилиндрической оболочки при указанном воздействии соотношений [5], полученных для систем со сферической симметрией.

Изменение длины цилиндрической оболочки приводит к значительным изменениям раскачки колебаний в наиболее нагруженной области, откуда следует, что существует принципиальная возможность управления эффектом подбором отношения L/D .

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпкин В. И., Иванов А. Г., Минеев В. И. и др. Атомная энергия, 1976, 41, 5, 303.
2. Бузуков А. А. ФГВ, 1976, 12, 4, 605.
3. Benham R. A., Duffey T. R. Intern. J. Mech. Sci., 1974, 16, 549.
4. Белов А. И., Клаповский В. Е., Корнило В. А. и др. ФГВ, 1984, 20, 3, 71.
5. Baker W. E., Allen F. I. // Proc. Third U. S. National Congress of Applied Mechanics, ASME.— N. Y., 1958.

г. Москва

Поступила в редакцию 5/1 1988,
после доработки — 8/VIII 1989

УДК 662.62 : 621.791.12

*В. Е. Кожевников, Ю. П. Бешапошников, И. К. Глобин,
В. В. Геймур, В. В. Раскатов, В. И. Чернухин*

ДЕТОНАЦИЯ ПЛОСКИХ ЗАРЯДОВ СМЕСЕВЫХ ВВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Основные параметры сварки взрывом: угол соударения γ и скорость точки контакта v_k можно вычислить для любого значения r ($r = m_{ВВ}/m_{пл}$, где $m_{ВВ}$ — масса ВВ, $m_{пл}$ — масса пластины), если известны скорость детонации D и показатель политропы продуктов детонации (ПД) [1, 2]. Как правило, D определяется экспериментально в каждом конкретном случае, поскольку в настоящее время не существует удовлетворительной методики ее расчета [3, 4]. Для сварки взрывом в основном используются промышленные ВВ: аммониты АТ-1, А-2Г, смеси аммонита 6ЖВ с различными компонентами. Естественно, что для всех ВВ надо знать D . В литературе имеется много данных по измерению величины D различных плоских зарядов ВВ применительно к сварке взрывом [5—11], однако эти сведения разрозненные, не охватывают весь сортамент ВВ и в большинстве случаев соответствуют узкому диапазону значений толщины заряда H [9—11].

В настоящей работе представлены результаты систематических измерений D плоских зарядов насыпной плотности размером $450 \times 300 \times (10 \div 60)$ мм промышленных ВВ: АТ-1, А-2Г, 6ЖВ и смесей 6ЖВ с АТ-1, А-2Г, аммиачной селитрой марки ЖВ (АС/ЖВ), поваренной солью

© 1990 Кожевников В. Е., Бешапошников Ю. П., Глобин И. К., Геймур В. В., Раскатов В. В., Чернухин В. И.