

5. Горбунов П. М. Решение одной задачи о движении упруговязких материалов.— ПМТФ, 1974, № 6.
6. Сабсай О. Ю., Колтунов М. А., Виноградов Г. В. Аналитическое описание ползучести полимеров в текучем состоянии в линейной области деформирования.— «Механика полимеров», 1972, № 4.
7. Бартнев Г. М., Зотеев Н. П., Ермилова Н. В. Особенности высокоэластического поведения каучукоподобных полимеров при малых скоростях деформирования.— «Механика полимеров», 1974, № 4.
8. Тихонов А. Н Самарский А. А. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1966.

УДК 620.178.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОДНОСЛОЙНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ИМПУЛЬСАМИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

*В. А. Баталов, А. Г. Иванов, Г. Г. Иванова,
В. Н. Минеев, В. Н. Софронов, В. И. Цыпкин*
(Москва)

Использование взрывчатых веществ (ВВ) в технологических процессах и экспериментальных исследованиях вызывает необходимость обеспечить герметизацию продуктов взрыва (ПВ), безопасность персонала и защиту оборудования при детонации ВВ. Часто условия испытаний предъявляют жесткие требования к габаритам и весу сосудов, предназначенных для локализации действия импульсных нагрузок различного вида.

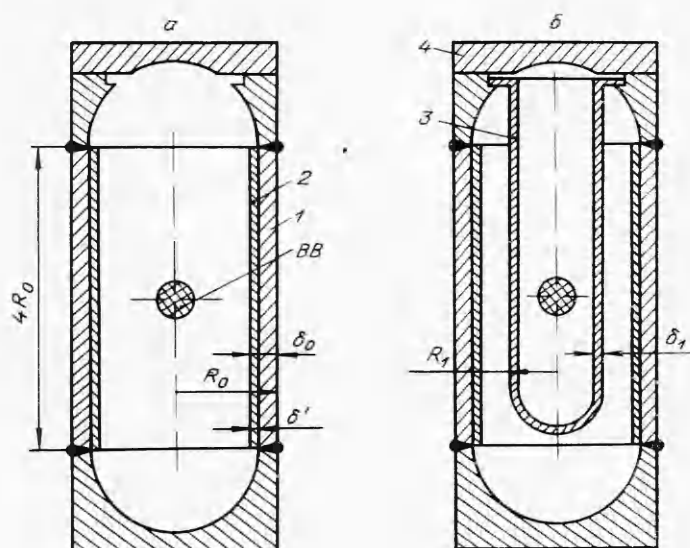
При изготовлении сосудов высокого давления, работающих при статических нагрузках (где определяющим рабочим параметром является давление), широко используются многослойные конструкции, в которых удается повысить уровень рабочего давления и избежать катастрофического разрушения конструкции в целом вследствие торможения трещин в отдельных слоях [1, 2].

Представляет интерес выяснить поведение многослойных оболочек при воздействии импульсных нагрузок различной длительности.

Исследовалось разрушение замкнутых цилиндрических сосудов с наружным радиусом R_0 и общей толщиной стенок δ_0 (фиг. 1), заполненных нормальной воздушной атмосферой, при взрыве внутри них заряда ВВ.

Различие в длительности импульсного нагружения достигалось различными схемами нагружения стенок сосудов. В первом случае (фиг. 1, а) стенки сосуда нагружались ПВ, во втором (фиг. 1, б)—ударом тонкой дополнительной оболочки 3, разгоняемой ПВ.

Сосуды изготовлены из аустенитной нержавеющей стали X18H10T (в состоянии поставки) и при одинаковых геометрических размерах имели разное исполнение корпуса 1. Однослойный корпус изготавливался из трубной заготовки (ГОСТ 5632-61) и имел один сварной шов вдоль образующей цилиндра. Корпус сочленялся без зазора с цельнотянутым сердечником 2 толщиной $\delta' = 2$ мм (фиг. 1). Многослойный корпус изготавливался путем намотки на сердечник пяти слоев миллиметровой ленты (лист 1 ГОСТ 3680-71) шириной $4 R_0$, т. е. был рулонированным [1]. Для исключения зазора между слоями намотка ленты осуществлялась с незначительным натягом; внутренний и внешний концы ленты закреплялись сваркой. Крышки сосудов 4 крепились двенадцатью болтами М 16. Исходные ме-



Фиг. 1

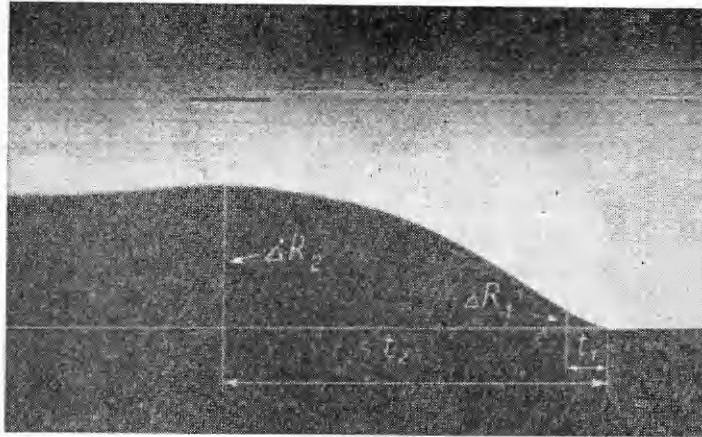
ханические свойства материалов однослойного и многослойного корпусов, определенные на образцах одинаковых размеров при статическом растяжении (скорость деформирования $5 \cdot 10^{-4}$ 1/с), приведены в табл. 1.

Заряд ВВ в виде шара с радиусом r (50% весовых тротила, 50% весовых гексогена, плотность $1,65$ г/см³) помещался в центре сосуда. Иницирование заряда осуществлялось из центра. Все опыты проведены при температуре $2-18^\circ\text{C}$ в сосудах, которые ранее не подвергались нагружению. Определялись ближайшие значения массы зарядов m , при которых сосуды разрушались и не разрушались. Сосуд считался разрушенным, если после опыта в его стенках обнаруживалась хотя бы одна сквозная трещина.

Процесс радиальной деформации центрального сечения (плоскость, перпендикулярная оси сосуда, проходящая через центр заряда ВВ) сосудов во времени исследовался методом фоторегистрации [3]. Типичная фотохронограмма приведена на фиг. 2 ($t_2 = 230$ мкс, $\Delta R_2 = 16$ мм, опыт 4, табл. 2). Кроме этого, конечная деформация сосудов регистрировалась по координатной сетке, нанесенной на их наружную поверхность. В опытах определялись интервалы времени от начала смещения стенок сосудов до достижения ими максимальной скорости v_0 (интервалы t_1) и соответствующая этому моменту радиальная деформация ϵ_1 ($\epsilon = \Delta R/R_0$, где $\Delta R = R - R_0$, R — текущее значение наружного радиуса сосуда); интервалы времени t_2 и величины деформации ϵ_2 от начала смещения стенок до их остановки или разрушения. В случае разрушения сосудов величины ϵ_2 уточнялись по координатным сеткам. Конечная радиальная и окружная деформации в центральном сечении неразрушившихся сосудов по данным фоторегистрации и координатных сеток совпадали.

Таблица 1

Материал	Предел текучести $\sigma_{s(0,2)}$, кгс/мм ²	Предел прочности σ_B , кгс/мм ²	Относительное удлинение δ , %
X18H10T Однослойный корпус	41	65	40
X18H10T Многослойный корпус	34	69	40



Фиг. 2

Значения v_0 определялись дифференцированием экспериментальных зависимостей $\Delta R - t$. В некоторых опытах определялись также периоды радиальных колебаний сосудов T .

Погрешность измерений временных интервалов в эксперименте оценивается в ± 3 мкс, а абсолютных перемещений $\Delta R \pm 0,5$ мм. Погрешность определения других величин составляла: $T \pm 10\%$, $v_0 \pm 10\%$, t_1 и $\varepsilon_1 \pm 15\%$, t_2 и $\varepsilon_2 \pm 5\%$ (сосуды не разрушались) и $\pm 10\%$ (сосуды разрушались).

Результаты экспериментов приведены в табл. 2. Там же приведены значения коэффициентов отбора энергии ϕ стенками сосуда от заряда ВВ в области центрального сечения. Как и в работе [3], значение ϕ определялось как отношение кинетической энергии сферического слоя материала сосуда с радиусом R_0 и толщиной δ_0 , движущегося со скоростью v_0 , к энергии заряда ВВ.

На фиг. 3 приведены экспериментальные зависимости $\Delta R - t$, полученные в одинаковых опытах по схеме А (номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2). На фиг. 4 показаны внешний вид сосуда с многослойным корпусом после опыта 9 и участки поперечного разреза в центральном сечении этого же сосуда, иллюстрирующие характер разрушения ($m = 120$ г). На фиг. 5 показано откольное разрушение в однослойном корпусе после опыта по схеме Б (опыт 6) в четырехкратном увеличении.

Согласно [4, 5], длительность импульса давления в проходящей волне для значений r/R_0 при нагружении сосудов по схеме А в экспериментах составляет $\tau_A \sim 100$ мкс.

При нагружении сосудов по схеме Б длительность импульса давления определяется двойным временем пробега ударной волны по толщине оболочки, ударяющей по стенкам сосуда, и составляет $\tau_B \sim 0,5$ мкс.

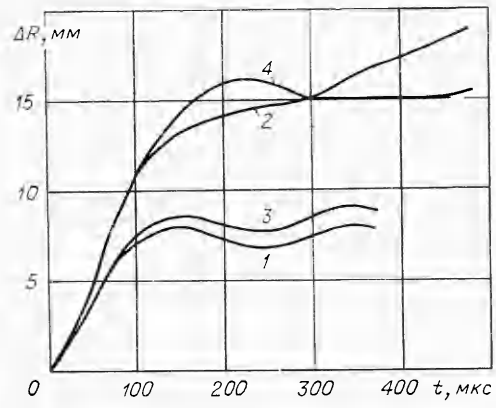
Отметим, что $\tau_A \gg \delta_0/c$, а $\tau_B < \delta_0/c$, где c — скорость звука в материале корпуса сосудов.

При нагружении сосудов по схеме А время разгона стенок $t_1 \sim 20$ мкс, что соизмеримо с временем t_2 . После достижения v_0 радиальная деформация сосудов до $t \sim 80$ мкс происходит практически при неизменной скорости смещения их стенок. Затем наблюдается активное торможение стенок сосудов до остановки с последующими колебаниями (см. фиг. 3).

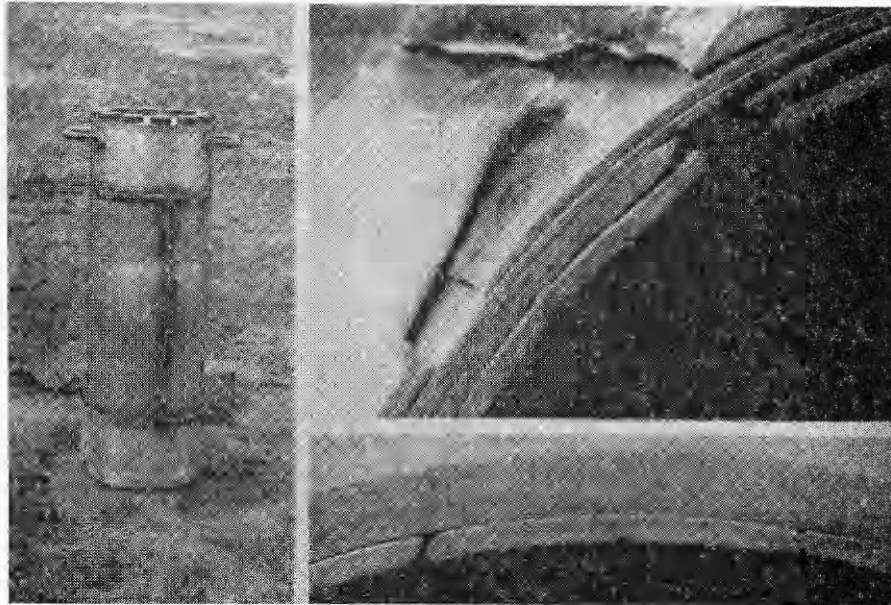
При нагружении сосудов по схеме Б стенки сосудов приобретают начальную скорость v_0 в результате удара оболочки, разгоняемой ПВ. Обо-

Таблица 2

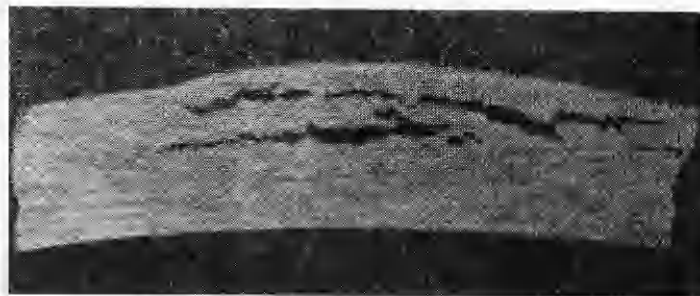
Номер опыта	Схема на-гружения	R_0 , мм	δ_0/R_0 , %	Исполнение кор-пуса	R_1 , мм	δ_1 , мм	m , г	r/R_0	v_0 , м/с	t_1 , мкс	ρ , %	t_2 , мкс	ε_2 , %	T , мкс	ϕ	Состояние сосуда после опыта
1	А	99,5	7,03	Многослойный			203	0,31	80	20	1,5	150	8	200	0,03	Не разрушился
2							297	0,35	125	25	1,7	—	15	0,045	Разрушился	
3	А	100	7,5	Однослойный			203	0,31	80	20	1,5	160	9	180	0,03	Не разрушился
4							297	0,35	125	25	1,7	—	16	0,045	Разрушился	
5	А	100	7,5	Однослойный	57	2	245						7			Разрушился
6							160									
7	Б	99,5	7,03	Многослойный	57	2	203		450							Разрушился
8							160									
9	Б	99,5	7,03	Многослойный	29	0,3	120						7			Начало разруше-ния
10							110									
11	Испытание только дополнительной оболочки $\delta_1/R_1=3,5\%$	57			57	2	160	$r/R_1=0,5$	650	16	12	48	45		0,2	Разрушился
12							203	$r/R_1=0,54$	800	20	15	50	50		0,24	Разрушился



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

лочка с $R_1 = 57$ мм и $\delta_1 = 2$ мм разрушается непосредственно перед ее ударом по стенкам сосуда (опыты 11, 12, табл. 2).

При использовании оболочки с $R_1 = 29$ мм и $\delta_1 = 0,3$ мм на внутренней поверхности стенок сосудов отмечено разрушение типа эрозии (глубина эрозийных кратеров 1—3 мм, поперечные размеры 1—4 мм), что может свидетельствовать об ударе по ним облака мелких осколков.

Характер деформации сосудов с однослойным и многослойным корпусом при нагружении по схеме А практически не различается (см. фиг. 3). Характер разрушения однослойного и многослойного корпуса сосудов различен. Так, в одном из опытов обнаружено торможение трещин на границах слоев многослойного корпуса (см. фиг. 4). Однослойный же корпус разрушался всегда с образованием сквозных трещин.

В приведенных опытах наблюдалась пластическая деформация в центральной области сосудов протяженностью (в осевом направлении) $\sim 2R_0$. Стенки сосудов пластически деформировались только в окружном направлении. По результатам измерений координатных сеток пластические деформации стенок сосудов в меридиальном направлении отсутствовали.

При нагружении по схеме А сосуды разрушаются при массах зарядов, почти вдвое больших, чем в опытах по схеме Б (опыты 2, 4, 6, 9). Деформация сосудов перед разрушением, нагруженных по схеме А, более чем вдвое превышает аналогичную величину при нагружении по схеме Б (опыты 2, 4, 5—9). Снижение массы разрушающего заряда ВВ может быть связано с двумя факторами:

а) с увеличением φ при уменьшении зазора между оболочкой и зарядом ВВ, например, при переходе от схемы А к Б при $m = 203$ г φ меняется от 0,03 (опыт 1) до 0,24 (опыт 12); б) с изменением свойств материала при его интенсивном нагружении. Так, согласно [6], относительное удлинение стали X18H10T после взрывного нагружения давлением $150 \cdot 10^8$ Н/м² снизилось до 10—15%. Аналогичный эффект, вероятно, имеет место и в нашем случае, так как при смене схемы нагружения А на Б давления в стенках сосудов существенно возрастают. Дополнительная оболочка с $R_1 = 57$ мм и $\delta_1 = 2$ мм в опытах по схеме Б приводит к значительному усилению действия ПВ в направлении оси сосуда и отрыву крышек при меньших зарядах ВВ (опыты 3, 4 и 6, 7). Оболочка с $\delta_1 = 0,3$ мм не вызывает такого эффекта (опыты 8—10). При определенных условиях удар дополнительной оболочки по стенкам сосудов вызывает откольное разрушение в них (опыты 5, 6, фиг. 5).

Однослойные и многослойные оболочки при $\tau_A \gg \delta_0/c$ имеют одинаковые зависимости $\Delta R - t$ (кривые 1, 3 на фиг. 3) и обладают примерно одинаковой прочностью (опыты 1—4). Наблюдаемое в эксперименте незначительное различие зависимостей $\Delta R - t$ для однослойной и многослойной оболочек (кривые 1, 3 на фиг. 3) объясняется некоторым различием в свойствах материалов.

Характер деформации однослойных и многослойных оболочек при $\tau_B < \delta_0/c$ существенно различен. Импульс в многослойной оболочке передается преимущественно внешним слоям, которые могут разрушаться, а остальные слои испытывают меньшие деформации. Однослойная же оболочка вся воспринимает сообщаемый импульс и при отсутствии откола целиком испытывает деформации.

Таким образом, поведение однослойных и многослойных оболочек при внутреннем динамическом нагружении существенно зависит от длительности действующего импульса и может значительно различаться, что необходимо учитывать при выборе типов конструкций и методов испытаний их прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и оборудование для проектирования сосудов на повышенные давления. М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1972, сер. II, № 14.
2. Petch N. J. Thin laminates can arrest fracture in pressure vessels.—«Engineer», 1969, vol. 229, N 5938, p. 51.
3. Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Васильев Л. В., Кустов В. С. Взрывное разрушение труб.— ФГВ, 1974, № 1.
4. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва.— В кн.: Физика взрыва. М., Изд-во АН СССР, 1952.
5. Адушкин В. В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе.— ПМТФ, 1963, № 5.
6. Богдановская Е. И., Дубнов Л. В. и др. О влиянии параметров детонации ВВ на упрочнение стали X18H10T.— ФГВ, 1975, № 5.

7ДК 539.374

**ОБ ОБРАЗОВАНИИ ЗАСТОЙНЫХ ЗОН
В ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ
НА ВЫПУКЛЫХ И ВОГНУТЫХ УЧАСТКАХ ЖЕСТКИХ ГРАНИЦ**

Е. М. Емельянов, А. Д. Чернышов
(Воронеж)

Задачи о течении вязкопластической среды [1] в каналах с возмущенной границей рассматривались ранее в работах [2, 3], методом малого параметра решены и задачи о течении в каналах эллиптического сечения [4].

1. Реологическое соотношение для вязкопластической среды Бингама—Шведова имеет вид

$$(1.1) \quad \sigma_{ij} = (\sqrt{2k}/\sqrt{\varepsilon_{q1}\varepsilon_{q1}} + 2\eta)\varepsilon_{ij} + P\delta_{ij}, 3P = \sigma_{ii},$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; ε_{ij} — компоненты тензора скоростей деформации; k — предел текучести; η — коэффициент вязкости.

Тензор скоростей деформации связан с компонентами вектора скорости течения среды v_i формулой Коши

$$\varepsilon_{ij} = (1/2)(v_{i,j} + v_{j,i}).$$

В обеих задачах, рассматриваемых в данной работе, отличной от нуля будет лишь компонента вектора скорости v_z , которую следует искать в цилиндрической системе координат в виде ряда по степеням малого параметра δ

$$v_z(r, \varphi) = v^0(r) + \delta v'(r, \varphi) + \dots$$

Для формулировки задачи в безразмерном виде отнесем напряжения к пределу текучести k , переменные длины к радиусу трубы R , скорость к величине kR/η . Тогда (1.1) в безразмерных переменных примет вид

$$(1.2) \quad \sigma_{ij} = (1 + I^{-1/2})2\varepsilon_{ij} + P\delta_{ij}, 3P = \sigma_{ii},$$

где $I = 2\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}$.