

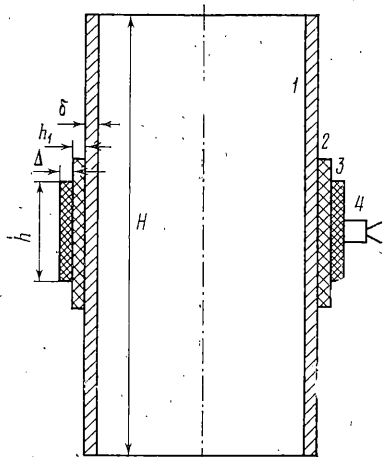
ИМПУЛЬСНОЕ СХЛОПЫВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

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

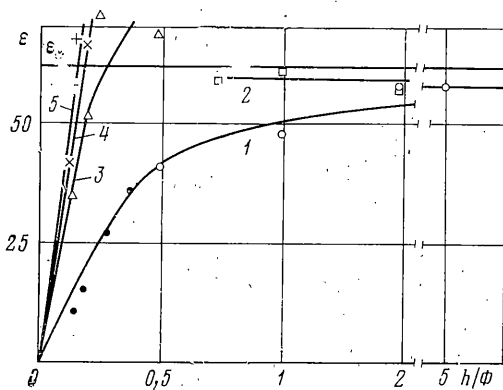
Исследуется процесс деформации цилиндрических оболочек при импульсном нагружении. Импульсная нагрузка создавалась подрывом зарядов взрывчатого вещества, концентрически расположенных на поверхности оболочек.

Обнаружено, что при подобном изменении размеров системы оболочка — заряд имеет место масштабный эффект, степень проявления которого зависит от начальной скорости движения стенки оболочки.

Известно, что импульсное схлопывание оболочек кругового поперечного сечения используется во многих технических устройствах — взрывных устройствах, позволяющих получать герметические соединения труб, магнестрикционных, применяемых для создания интенсивных магнитных полей [1], и т. д. В работах [2–7] теоретически и экспериментально показано возникновение потери устойчивости цилиндрической оболочки при воздействии импульса внешнего давления. Потеря устойчивости возникает при деформации $\sim 10\%$ [3, 8, 9]. Различные теории динами-



Фиг. 1



Фиг. 2

ческой потери устойчивости для оболочек из материалов с линейным упрочнением предлагались в [3, 5, 8, 10, 11].

Экспериментальное исследование поведения оболочек под действием локально приложенной импульсной нагрузки выполнено в [12]. Влияние области нагружения на характер деформации оболочки исследовалось в [13], где показано, что при двумерной деформации оболочки (в осевом и радиальном направлениях) при помощи динамической теории потери устойчивости [3] не удается описать эксперимент. Кроме того, развитые теории экспериментально проверены лишь в области деформаций порядка 10%. Область больших пластических деформаций оболочек, вплоть до их полного перекрытия, исследована, по-видимому, значительно слабее, о чем свидетельствует отсутствие публикаций по данному вопросу.

Цель данной работы — экспериментальное исследование импульсного осесимметричного схлопывания стальных оболочек в зависимости от величины удельного импульса и размера области его приложения; а также от размеров геометрически подобных оболочек. Во всех экспериментах начальная кинетическая энергия оболочек была сравнима с диссипацией энергии в процессе их схлопывания.

1. Схема постановки экспериментов приведена на фиг. 1. На поверхности оболочки (трубы) 1 размещался заряд 3 взрывчатого вещества, при взрыве которого стенка оболочки получала удельный импульс I_0 .

Ширина заряда изменялась в пределах $h=10\div 540$ мм. Длина труб H не менее чем в два раза превышала ширину заряда. Для предотвращения откола от внутренней поверхности трубы между взрывчатым веществом и стенкой трубы помещался демфер 2 из пористой резины плотностью 375 кг/м³, либо из ткани (сукна). Детонация осуществлялась в одной точке электродетонатором 4.

В опытах использовались цельнотянутые трубы $\varnothing 108\times 4$ мм и $\varnothing 325\times 12$ мм из ст. 20. Механические свойства материала труб определялись на стандартных образцах ГОСТ 1497–61 типа III. Образцы вырезались из каждой трубы. Результаты испы-

таний показали, что $\sigma_b=430\div480$ МН/м², $\sigma_T=280-310$ МН/м² и относительное удлинение $\sim 25\%$. Часть опытов была проведена на трубах $\varnothing 108\times 4$ мм из ст. 10.

Для исследования влияния размера цилиндрической оболочки на характер ее деформирования использовались две партии геометрически подобных труб из ст. 20 следующих типоразмеров: $\varnothing 108\times 4$ мм, длиной 360 мм и $\varnothing 325\times 12$ мм длиной 1080 мм. Коэффициент изменения масштаба оболочек был равен трем. Также в три раза изменялись геометрические размеры заряда и толщина демпфера (использовалось сукно толщиной 1,6 мм в один, либо в три слоя).

N	$h\times\Delta$	h_1	$I_0 10^{-2}$	W	$\varepsilon, \%$	n	n_2
1	15×3	4	0,1	290	41	6	6
2	20×3	4	0,1	290	15	6	6
3	30×3	4	0,1	290	27	6	6
4	40×3	4	0,1	290	36	6	6
5	54×3	4	0,1	290	41	8	6
6	108×3	4	0,1	290	48	7	6
7	216×3	4	0,1	290	58	7	6
8	540×3	4	0,1	290	58	7	6
9	540×3	4	0,1	290	43	7	6
10	80×3,5	1,6	0,115	340	59	6	6
11	108×3,5	1,6	0,115	340	61	6	6
12	216×3,5	1,6	0,115	340	57	6	6
13	15×7	1,6	0,23	680	36	8	9
14	21×7	1,6	0,23	680	53	8	9
15	28×7	1,6	0,23	680	72	8	9
16	54×7	1,6	0,23	680	69	8	9
17	15×10	1,6	0,33	840	42	8	10
18	21×10	1,6	0,33	840	67	8	10
19	15×16	1,6	0,53	1340	53	7	12
20	15×20	1,6	0,63	1680	58	7	14
21	21×20	1,6	0,63	1680	77	7	14
22	50×7	1,6	0,23	680	70	6	9
23	150×21	4,8	0,69	680	—	—	9
24	70×7	1,6	0,23	680	—	—	9
25	210×21	4,8	0,69	680	—	—	9
26	28×7	1,6	0,23	680	75	8	9
27	84×21	4,8	0,69	680	57	—	9
28	50×5	1,6	0,165	470	72	7	7
29	150×15	4,8	0,5	470	46	—	7
30	108×3,5	1,6	0,115	370	61	6	6
31	325×10,5	4,8	0,35	370	50	—	6

Пропорциональное увеличение толщин оболочки, заряда и демпфера обеспечивает равные начальные скорости оболочек обоих типоразмеров. В опытах использовались заряды, размеры которых обеспечивали, как правило, полное пересечение труб $\varnothing 108\times 4$ мм.

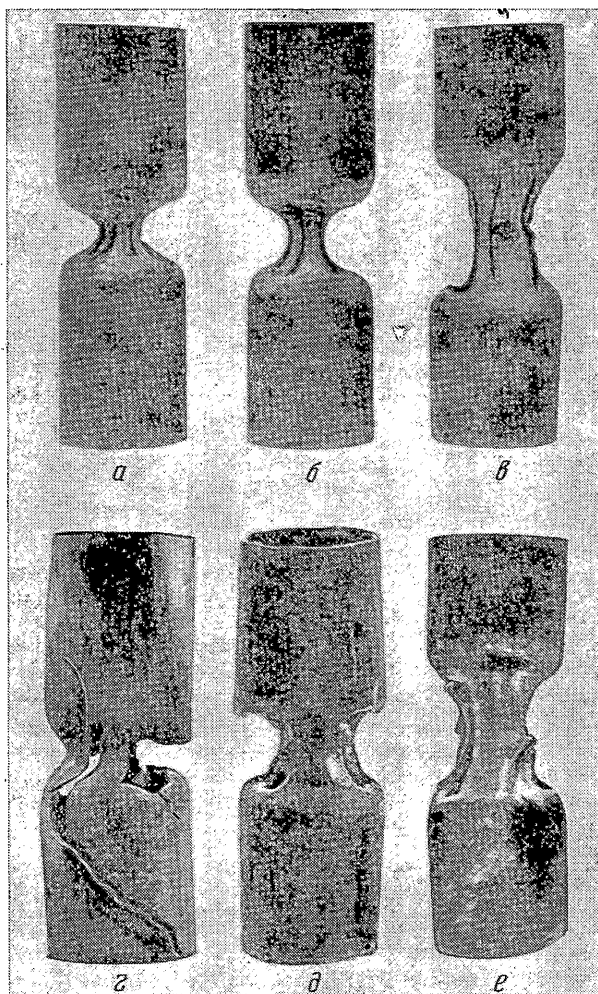
Так как интервал времени, за который происходит отбор энергии от взрывчатого вещества стенок трубы (этап разгона), значительно меньше времени движения трубы, то осуществлялся короткий удар и последующее движение стенки трубы происходило по инерции. Как следует из экспериментов, одномерное радиальное схождение стенок трубы к ее оси сопровождается потерей устойчивости и приводит к образованию складок.

После опытов определялась величина средней относительной деформации ε в центральном сечении сжатой трубы и число складок n в этом сечении. Значение ε вычислялось по формуле $\varepsilon=(R_0-R)/R_0$, где R_0 — начальный наружный радиус трубы и R — его значение после опыта, определяемое из условия равенства площади центрального сечения, ограниченного наружным контуром площади равновеликого круга.

Результаты всех опытов сведены в таблицу. В опытах 1–8 использовались трубы из ст. 10, во всех остальных — из ст. 20. В таблице приведены также значения удельного импульса I_0 (кН·с/м²), скорости стенки трубы W (м/с), рассчитанной при помощи результатов опытов по разгону пластин [14] и расчетного числа волн возмущений (складок) n_2 [5, 10] (h_1 — толщина демпфера в мм, в опытах 1–9 использовалась резина, а в остальных случаях — сукно). Размеры оболочек $\varnothing\times\delta\times H$ (мм) в экспериментах были следующими: $108\times 4\times 216$ опыты 1–4, 10, 11, 13–21; $108\times 4\times 1080$ опыты 5–9; $108\times 4\times 360$ опыты 22, 24, 26, 28, 30; $325\times 12\times 1080$ опыты 23, 25, 27, 29, 31. Фактическое значение W в опытах 17–21 может быть меньше указан-

ного вследствие бокового разлета продуктов взрыва. В опытах 23–25 оболочки были перерезаны на две части.

Зависимость средней относительной деформации ϵ для трубы $\varnothing 108 \times 4$ мм от величины удельного импульса I_0 и ширины области нагружения h приведены на фиг. 2. Кривые соответствуют следующим удельным импульсам ($\text{кН} \cdot \text{с}/\text{м}^2$): 1–10; 2–11,5; 3–23; 4–33; 5–66. Темные точки на кривой 1 заимствованы из [13]. Линия $\epsilon_* = 62\%$ на фиг. 2 соответствует максимальному значению деформации в предпо-



Фиг. 3

ложении, что стенки трубы одномерно радиально, без потери устойчивости, сходятся к ее оси.

Из данных фиг. 2 следует, что при увеличении I_0 полное перекрытие трубы реализуется при меньшей ширине заряда h . При $I_0 = 23 \div 66 \text{ кН} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ полное перекрытие трубы характеризуется деформацией, большей величины ϵ_* . Это связано с тем, что при таких значениях I_0 происходит различный разлет материала из зоны сжатия трубы после ее фокусировки. Кроме того, утонение стенки трубы за счет тангенциального движения также может привести к этому эффекту.

2. Развитые в [3, 5, 10] теории динамического выпучивания цилиндрических оболочек были сравнены с экспериментом при $\epsilon \leq 10\%$. Представляет интерес провести сравнение с экспериментом и при $\epsilon > 10\%$.

Из [3, 5, 10] следует, что если выполняется условие $W > c\epsilon_y$, то окончательная картина складок на боковой поверхности оболочки определяется пластическими свойствами материала оболочки. Число волн n_1 при этом будет равно [3]:

$$n_1 = \sqrt[3]{6} (R_0/\delta) (\sigma_T/Eh)^{1/2} \quad (2.1)$$

где c — скорость звука в материале оболочки, ε_y — деформация материала при достижении предела текучести, δ — толщина оболочки, R_0 — радиус оболочки, σ_T — предел текучести материала оболочки, E_h — модуль упругости.

При $W < c\varepsilon_y$ число волн определяется упругими свойствами материала оболочки и составляет [5, 10]:

$$n_2 = 2(R_0/\delta) (W/c)^{1/2} \quad (2.2)$$

В первом случае реакция оболочки полностью определяется свойствами материала и размерами оболочки, а во втором — зависит также от начальной скорости движения оболочки. Используя данные [15], в которой приведены динамические кривые σ — ε при скорости деформации $\sim 2 \cdot 10^3$ с⁻¹ для ст. 1020, близкой по свойствам к ст. 20, имеем: $\sigma_T = 0,65$ ГН/м², $E_h = 0,55$ ГН/м², $\varepsilon_y = 0,00325$.

В проведенных экспериментах $c\varepsilon_y = 19,5$ м/с $< W$ (для стали $c = 6000$ м/с) и число «волн возмущений» должно определяться выражением (2.1). Как показывает расчет, в этом случае $n_1 = 34$. Найденная величина n_1 не согласуется с экспериментом. К такому же выводу пришли и авторы работ [5, 6], где аналогичное расхождение связывается с тем, что потеря устойчивости определяется не только пластическими свойствами материала оболочки, но зависит от предшествующей и последующей (при разгрузке) упругой деформации.

Значения n_2 , вычисленные по формуле (2.2), приведены в таблице. Сравнение n_2 и n показывает в основном их хорошее согласие. Исключения составляют опыты, в которых использовались заряды шириной h порядка их толщины Δ (опыты 17 ≠ 21). В этом случае за счет бокового разлета продуктов взрыва фактическое значение W , входящее в выражение (2.2), может быть меньше величины W , указанной в таблице.

Опыты 26 ÷ 31 позволяют понять влияние масштаба и начальной скорости схлопывания труб на их прочность. На фиг. 3, a — e приведены фотографии малых и больших геометрически подобных труб после опытов. Фотографии a — e соответствуют трубам $\varnothing 108 \times 4$ мм; g — e — трубам $\varnothing 325 \times 12$ мм. Начальные скорости схлопывания труб составляют (м/с): a, g — 680, b, d — 470, e, e — 370.

Анализ фотографии фиг. 3 позволяет сделать следующие выводы: при $W = 370$ м/с малые и большие трубы не разрушаются; при $W = 470$ и 680 м/с малые трубы не разрушаются, а большие — разрушаются. Это свидетельствует о существовании масштабного эффекта при разрушении геометрически подобных труб в процессе их инерционного схождения к оси симметрии. Ранее, при динамическом воздействии, масштабный эффект экспериментально был обнаружен при разрушении стальных сосудов от взрыва внутри них зарядов взрывчатого вещества [16]. В [16] масштабный эффект проявлялся в уменьшении прочности и увеличении склонности к трещинообразованию сосудов с увеличением их геометрических размеров. Особенностью данной работы является то, что в ней в отличие от [16] зарегистрирован масштабный эффект при более сложном напряженном состоянии в процессе схождения части трубы к центру и потери ее устойчивости. Наиболее резкое проявление масштабного эффекта — переход от пластического течения к хрупкому разрушению с нарушением сплошности — получено на подобных трубах из мягкой стали $\varnothing 104$ и 325 мм при радиальной скорости схлопывания 500—700 м/с.

Сравнение результатов опытов по нагружению труб зарядами различной ширины при постоянной величине удельного импульса показывает, что если в опытах с трубами $\varnothing 108 \times 4$ мм с увеличением ширины заряда происходило увеличение деформации [13], то в опытах с трубами $\varnothing 325 \times 12$ мм происходит увеличение степени разрушения оболочки в зоне нагружения, вплоть до полного перерезания трубы.

Природа этих явлений, по-видимому, одинакова и объясняется масштабным эффектом энергетической природы [17, 18].

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрахамсон Г. Р. Критическая скорость разрушения цилиндрической оболочки кругового поперечного сечения без выпучивания. — В кн.: Механика. Вып. 8. Нестационарные процессы в деформируемых телах. М.: Мир, 1976, с. 51—62.
2. Лавренко М. А., Ишлинский А. Ю., Динамические формы потери устойчивости упругих систем. — Докл. АН СССР, 1949, т. 64, № 6, с. 779—782.
3. Abrahamson G. R., Goodier J. N. Dynamic plastic flow buckling of a cylindrical shell from uniform radial impulse. — Proc. 4th U. S. National Congress, Appl. Mech., Berkeley, California, 1962, v. 2. New York: ASME, p. 939—950.
4. Hodge P. A. The influence of blast characteristics of the final deformation of circular cylindrical shells. — J. Appl. Mech., 1956, v. 23, No. 4, p. 617—624.
5. Lindberg H. E. Buckling of very thin cylindrical shell due to an impulsive pressure. — Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech., 1964, v. 31, No. 2, p. 267—272. — Рус. перев.: Прикл. механ. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., 1964, т. 31, № 2, с. 120—127.
6. Stuiiver W. On the buckling of rings subject to impulsive pressures. — Trans. ASME. J. Appl. Mech. Ser. E, 1965, v. 32, No. 3, p. 511—518. — Рус. перев.: Прикл. механ. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., 1965, т. 32, № 3, с. 35—43.
7. Вольмир А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972, с. 432.
8. Anderson D. L., Lindberg H. E. Dynamic pulse buckling of cylindrical shells under

- transient lateral pressures.—AIAA Journal, 1968, v. 6, No. 4, p. 589–598.— Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, 1968, № 4, с. 16–27.
9. *Малый В. И.* Потеря устойчивости пластической оболочки при обжатии сильным импульсом давления.—Тр. VIII Всес. конф. по теории оболочек и пластин. М.: Наука, 1973, с. 167–171.
 10. *Goodier J. N., McIvor I. K.* The elastic cylindrical shell under nearly uniform radial impulse.—Trans. ASME, Ser. E, J. Appl. Mech., 1964, v. 31, No. 2, p. 259–266.— Рус. перев.: Прикл. механ. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., 1964, т. 31, № 2, с. 111–119.
 11. *Florence A. L.* Buckling of viscoplastic cylindrical shells due to impulsive loading.—AIAA Journal, 1968, v. 6, No. 3, p. 532–537.— Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, 1968, № 3, с. 185–191.
 12. *Скурлатов Э. Д.* Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек под действием подвижных нагрузок.—Тр. Всес. VIII конф. по теории оболочек и пластин. М.: Наука, 1973, с. 565–568.
 13. *Иванов А. Г., Клещевников О. А., Минеев В. Н., Тюнькин Е. С.* Потеря устойчивости стальной трубы при коротком осесимметричном ударе.—Изв. АН СССР. МТТ, 1976, № 5, с. 172–174.
 14. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972. 221 с.
 15. *Hoggat C. R., Recht R. F.* Stress-strain data obtained at high rates using expanding ring.—Exptl. Mech., 1969, v. 9, No. 10, p. 441–448.
 16. *Иванов А. Г., Силицын В. А., Новиков С. А.* Масштабные эффекты при динамическом разрушении конструкций.—Докл. АН СССР, 1970, т. 194, № 2, с. 316–317.
 17. *Иванов А. Г., Минеев В. Н.* О масштабном критерии при хрупком разрушении конструкций.—Докл. АН СССР, 1975, т. 220, № 3, с. 575–578.
 18. *Иванов А. Г., Минеев В. Н.* О масштабных эффектах при разрушении.—Физика горения и взрыва, 1979, № 5, с. 70–95.

Москва

Поступила в редакцию
2.IV.1979

УДК 539.3.534.1

УСТОЙЧИВОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ

ЛОКОЩЕНКО А. М., ШЕСТЕРИКОВ С. А.

Подробный обзор ряда подходов к решению задачи устойчивости и потери несущей способности цилиндрических оболочек, выполненных из упругого материала, приведен в [1]. В данной работе изложен новый приближенный метод решения этой задачи, позволяющий получить оценки и для случая, когда материал оболочки подчиняется соотношениям нелинейной ползучести. Этим методом получено также решение для оболочек из линейно и нелинейно-упругого материала. Сравнение решения для линейно-упругой оболочки с известными решениями позволяет оценить точность развиваемого метода.

1. Общие соотношения. Рассмотрим длинную круговую цилиндрическую оболочку толщиной H и радиусом поперечного сечения R_0 , находящуюся под действием изгибающего момента M_0 . Делаются предположения о том, что реальное сечение оболочки можно заменить на двухслойное и поперечное сечение может быть представлено в виде двух дуг окружностей [2]. Обозначим расстояние между центрами слоев, полученных при замене реальной оболочки толщины H на идеализованную двухслойную, $2h$, а толщину каждого слоя — δ . Согласно [3], для материала со степенным законом деформирования $\epsilon \sim \sigma^n$ параметры двухслойной оболочки приняты следующими: $\delta = H/2$, $2h = (n/(2n+1))^{1/n} H$, $q = n/(n+1)$.

Значения всех параметров на наружном слое оболочки обозначим верхним индексом (+), значения на внутреннем слое — верхним индексом (—).

Поперечное сечение нейтральной поверхности оболочки имеет две оси симметрии Ox , Oy , поэтому можно рассматривать только одну четверть этого сечения — кривую $A_1A_3A_2$ (фиг. 1). Принимается следующая геометрическая гипотеза: кривая $A_1A_3A_2$ в процессе деформирования оболочки все время состоит из двух круговых дуг равной длины A_1A_3 и A_2A_3 , соответствующих радиусам R_1 и R_2 и центральным углам $(0,5\pi - \varphi)$ и φ . Использование этой гипотезы позволяет определить радиусы R_1 и R_2 и расстояния до максимально и минимально удаленных точек сечения $OA_1 = b_1$ и $OA_2 = b_2$:

$$R_1 = 0,5\pi R_0 (\pi - 2\varphi)^{-1}, \quad R_2 = 0,25\pi R_0 \varphi^{-1}, \quad b_1 = R_1 + (R_2 - R_1) \sin \varphi, \quad b_2 = R_2 - (R_2 - R_1) \cos \varphi \quad (1.1)$$

а также все характеристики деформированного состояния через один параметр — угол φ . При изгибе оболочки изменением длины дуги $A_1A_3A_2$ в поперечном сечении можно пренебречь.