

УДК 539.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОТЕРИ
УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ИЗГИБЕ***

© 2013 г. **Е.Г. Гоник¹, А.И. Кибец², М.В. Петров¹, Т.Г. Федорова¹**

¹Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары

²НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

kibec@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 17.12.2012

Экспериментально исследуются деформирование и потеря устойчивости заполненных песком замкнутых цилиндрических оболочек при изгибе. Анализируется влияние подкрепления (ребер жесткости) на устойчивость оболочки.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, потеря устойчивости, изгиб, критическая нагрузка, подкрепление, экспериментальный анализ.

Экспериментальные исследования играют значительную роль в изучении устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек [1, 2]. На начальном этапе изучалась качественная сторона потери устойчивости и закритического поведения оболочек [3–5]. Полученные в результате экспериментов критические нагрузки оказались намного ниже классических значений, определяемых теоретическим путем. Дальнейшие исследования были направлены на определение влияния на расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований причин, связанных как с несовершенством математических моделей (совершенная форма оболочек, упругий материал, идеальное закрепление), так и с некачественностью проводимых экспериментов (неравномерность распределения нагрузки, местные дефекты образцов, овальность оболочек, некачественное закрепление образцов) [6, 7]. Среди экспериментальных работ большую часть составляют исследования напряженно-деформированного состояния оболочек при осевом сжатии, при осевом сжатии в комбинации с внутренним давлением, при внешнем давлении, при действии поперечной силы, при поперечной нагрузке в комбинации с внутренним давлением [1, 2, 8]. Отдельно можно выделить ряд экспериментальных работ на устойчивость цилиндрических оболочек при локальных воздействиях [9–14]. В работах [15–18] исследовалась устойчивость предварительно сжатой в осевом направ-

* Выполнено при финансировании Минобрнауки РФ (соглашение 14.В37.21.0227), Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ- 2843.2012.8) и РФФИ (гранты №11-08-00557-а, 13-08-90733-мол_рф_нр, 12-08-33106-мол_а_вед, 12-08-12044-офи_м).

лении цилиндрической оболочки при последующем ударном нагружении в поперечном направлении. В [19–22] проведен анализ деформирования и устойчивости цилиндрических оболочек, заполненных цементом.

Устойчивость цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, при изгибе остается до сих пор малоизученной. Сложность теоретического изучения рассматриваемой проблемы заключается в правильном описании поведения заполнителя. В настоящей статье излагаются результаты экспериментального исследования устойчивости заполненной песком замкнутой цилиндрической оболочки при поперечном изгибе, полученные с целью верификации компьютерной модели большегрузной емкости для автомобильной транспортировки сыпучих грузов [23]. Анализируется влияние ребер жесткости на величину критической нагрузки и формоизменение оболочки.

Разработка экспериментальной установки и методики испытаний для анализа устойчивости заполненной сыпучим материалом замкнутой цилиндрической оболочки при изгибном нагружении

На первом этапе для выполнения экспериментальных исследований определяются размеры модельного образца. Емкость для автомобильной транспортировки сыпучих грузов [23] выполнена из алюминиевого сплава АМг5 ГОСТ 4784-97 и имеет следующие размеры: внутренний радиус $R = 1270$ мм, толщина стенки $h = 5$ мм ($h/R = 0,00393$), расстояние между опорами $L = 15973$ мм ($R/L = 0,08$). Для изготовления модельных образцов цистерн использованы стальные листы. Толщина листов варьируется, но таким образом, чтобы сохранились соотношения $h/R = 0,00393$ и $R/L = 0,08$. Размеры образцов определяются расчетами по балочной схеме [24]. Для изготовления испытуемого образца применялась сталь Ст3, предел текучести σ_T которой равен 210 МПа. Расчет производится по предельному состоянию. Рассматривались варианты загрузки оболочки: а) водой, б) стальным порошком и в) речным песком. Как показали расчеты, цилиндрическая оболочка теряет устойчивость при предельных продольных напряжениях σ_z порядка $(0,7 \div 0,75)\sigma_T$. Для емкости диаметром $D = 408$ мм, выполненной из стального листа толщиной $h = 0,8$ мм, длина L , необходимая для потери устойчивости при загрузке водой, речным песком и стальным порошком, должна составлять $L_{\text{вода}} \approx 8 \div 9$ м, $L_{\text{песок}} \approx 5,5 \div 6,5$ м и $L_{\text{ст}} \approx 3 \div 4$ м соответственно.

Исходя из полученных данных, в соответствии с теорией подобия [25] для экспериментального обоснования вычислительной модели [23] были выбраны стальные (Ст3) тонкостенные трубы с наружным диаметром $D = 160$ мм, толщиной стенки $h = 0,75$ мм, длиной 2500 мм. Внутри трубы равномерно загружается речной песок массой $m = 60$ кг. Труба с песком устанавливается по торцам на две шарнирные опоры. Расстояние между опорами $L = 2400$ мм. Поскольку по расчетным данным труба под действием весовой нагрузки в этом случае не теряет устойчивость, к ней прикладывается дополнительная поперечная сила. Разработанная экспериментальная установка представлена на рис. 1. Дополнительные поперечные силы создаются домкратом (отмечен цифрой 1 на рис. 1) и передаются на оболочку через нагружающее устройство 2.

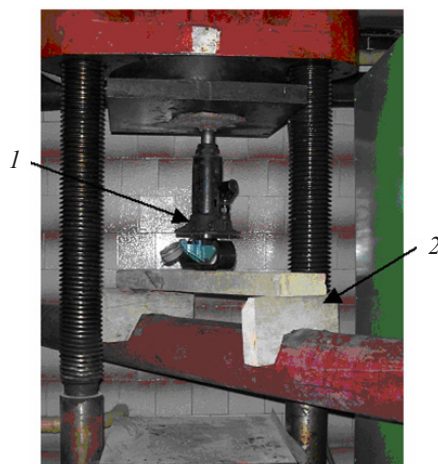


Рис. 1. Экспериментальная установка

Экспериментальное определение критической нагрузки замкнутой цилиндрической оболочки, заполненной песком, производится по следующей программе испытаний.

После установки на опоры образец нагружается поперечными силами F , величина которых увеличивается с шагом $\Delta F = 0,5$ кН. По мере приближения к критическому значению ΔF уменьшается до $0,1$ кН. В процессе пошагового нагружения выполняются следующие операции:

- 1) индикатором часового типа ИЧ-10 замеряется прогиб на середине длины оболочки;
- 2) с помощью прямоугольной рамки с двумя индикаторами часового типа измеряются диаметры в горизонтальном и вертикальном направлении;
- 3) двумя тензодатчиками в продольном и окружном направлениях определяются деформации на середине длины образца в верхней и нижней точках;
- 4) осуществляется фотосъемка гофрообразования.

Критическая нагрузка определялась методом точки перегиба [7]. Согласно этому методу анализируется зависимость нагрузка – прогиб оболочки. Нагрузка считается критической, если ее последующее малое приращение приводит к резкому увеличению прогиба оболочки.

Экспериментальные исследования устойчивости заполненной песком цилиндрической оболочки при изгибе

На рис. 2–4 изображены соответственно формы после потери устойчивости гладкой оболочки и оболочек с ребром жесткости – крепление болтами и крепление сваркой. Для этих же образцов на рис. 5 приведены графики зависимости прогиба U в центральном поперечном сечении оболочки от нагружающей силы $F = F_0 + F_3 + F_H$ (F_0, F_3 – вес оболочки и заполнителя, F_H – нагрузка от домкрата).

Анализ результатов экспериментов для гладкой оболочки показывает, что при смещении нагружающего устройства примерно на 10 мм в средней части цилиндрической оболочки образуется локальная поперечная вмятина. При дальнейшем нагружении длина вмятины увеличивается в окружном направлении, пока не достигнет приблизительно половины диаметра оболочки, после чего ее развитие прекращается.

Последующее смещение нагружающего устройства приводит к расширению зоны потери устойчивости оболочки в окружном направлении за счет образования новых вмятин, расположенных в шахматном порядке относительно первой. На момент окончания нагружения на оболочке образовалось 5 гофров длиной 70–80 мм в окружном направлении (см. рис. 2).



Рис. 2. Образец без подкрепления (закритическая форма оболочки)



Рис. 3. Форма потери устойчивости образца, усиленного уголком 25 мм × 25 мм × 4 мм (крепление болтами через 100 мм)



Рис. 4. Образец, усиленный уголком 25 мм × 25 мм × 4 мм (крепление сваркой), после потери устойчивости

Потеря устойчивости образцов, подкрепленных при помощи болтов уголком, происходит следующим образом. Сначала в оболочке между закреплениями образуются гофры в верхней части оболочки (см. рис. 3). При последующем увеличении нагрузки происходит общая потеря устойчивости конструкции с захватом подкрепляющего элемента (уголка). Критическая нагрузка при таком креплении ребра жесткости практически не меняется (см. рис. 5), но прогиб оболочки, при котором происходит потеря устойчивости, уменьшается примерно на 40%.

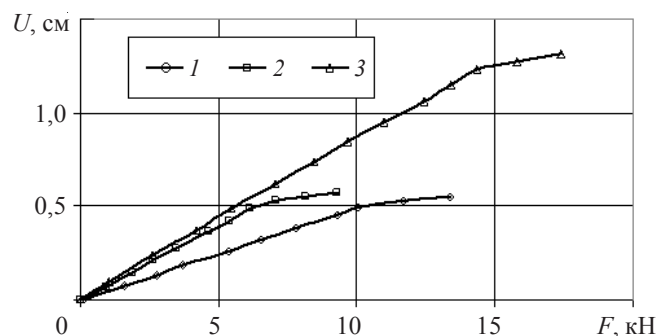


Рис. 5. Зависимость прогиба оболочки от нагрузки:
 1 – гладкая оболочка, 2 – ребро жесткости прикреплено к оболочке болтами,
 3 – ребро прикреплено к оболочке сваркой

Если уголок приварен к оболочке, критическая нагрузка увеличивается в 2,5 раза (см. рис. 5). Поскольку в этом случае ребро значительно усиливает жесткость конструкции, оболочка не испытывает больших формоизменений в рассмотренном диапазоне нагружения (см. рис. 4).

Выводы

Разработаны экспериментальная установка и методика испытаний для анализа устойчивости заполненной сыпучим материалом замкнутой цилиндрической оболочки при изгибном нагружении.

Проведены экспериментальные исследования устойчивости цилиндрической оболочки, заполненной песком, при изгибе. В ходе экспериментов регистрировались формоизменение оболочки, прогиб в характерных точках, значение изгибающей нагрузки.

На основе полученных результатов определена величина критической нагрузки. Показано, что условия крепления ребер жесткости к оболочке существенно влияют на ее закритическое поведение и величину критической силы.

Список литературы

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
2. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. М.: Наука, 1978. 360 с.
3. Fairbairn W. On the resistance of tubes to collapse // Philos. Trans. Roy. Soc. London. 1858. Vol. 148. P. 389–414.
4. Lilly W.E. The desing of struts // Engineering. 1908. Vol. 85. P. 37–40.
5. Mallock A. Note on the instability of tubes subjected to end pressure and on the folds in a flexible material // Proc. Roy. Soc. 1908. Vol. 81, №A-549. P. 388–393.
6. Simitsen G.J. Buckling and postbuckling of imperfect cylindrical shell: A review // Applied Mechanics Reviews. 1986. Vol. 39, №10. P. 1517–1524.
7. Абросимов Н.А., Баженов В.Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. 400 с.
8. Гудрамович В.С. Устойчивость упругопластических оболочек. Киев: Наукова думка, 1987. 216 с.
9. Выборнов В.Г., Коноплев Ю.Г., Коноплев И.Г. Экспериментальное исследование рационального подкрепления цилиндрических оболочек при действии локальных нагрузок // Исследования по теории пластин и оболочек. Казань: Изд-во Казанс. ун-та, 1975. № 11. С. 174–180.
10. Моссаковский В.И., Маневич Л.И., Мильцын А.М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. Киев: Наукова думка, 1977. 141 с.

11. Никулин М.В. Экспериментальное исследование прочности цилиндрических оболочек при действии локальных нагрузок // Прочность и динамика авиационных двигателей: Науч. труды. М.: Машиностроение, 1966. Вып. 3. С. 3–32.
12. Нерубайло Б.В. Локальные задачи прочности цилиндрических оболочек. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.
13. Коноплев Ю.Г. Экспериментальное исследование задачи о действии сосредоточенной силы на цилиндрическую оболочку // Исследования по теории пластин и оболочек. Казань: Изд-во Казанс. ун-та, 1966. № 4. С. 83–90.
14. Гурьянов Н.Г., Коноплев Ю.Г. Экспериментальное исследование прочности цилиндрических оболочек при локальных силовых воздействиях // Труды VI Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластинок. М.: Наука, 1966. С. 327–332.
15. Zeinoddini M., Harding J.E., Parke G.A.R. Dynamic behaviour of axially pre-loaded tubular steel members of offshore structures subjected to impact damage // J. Ocean Eng. 1999. Vol. 26. P. 963–978.
16. Zeinoddini M., Harding J.E., Parke G.A.R. Contribution of ring resistance in the behaviour of steel tubes subjected to a lateral impact // Int. J. of Mech. Sciences. 2000. Vol. 42, No 12. P. 2303–2320.
17. Zeinoddini M., Parke G.A.R., Harding J.E. Behaviour of axially preloaded steel tubes subjected to lateral impacts (an experimental study) // J. Impact Eng. 2002. Vol. 27, No 6. P. 669–690.
18. Zeinoddini M., Parke G.A.R., Harding J.E. Interface forces in laterally impacted steel tubes // Int. J. of Exper. Mech.. 2008. Vol. 48, No 5. P. 265–280.
19. Zhi-wu Yu, Fa-xing Ding, Cai C.S. Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns // J. of Constructional Steel Research. 2007. Vol. 63. P. 165–174.
20. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns / K. Sakina, H. Nakahara, S. Morino et al. // J. of Structural Engineering. 2004. Vol. 130, No 2. P. 180–188.
21. Han L.-H., Yao G.-H. Experimental behaviour of thin-walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC) // Thin-Walled Structures. 2004. Vol. 42, No 9. P. 1357–1377.
22. Zhao X.L., Grzebieta R., Elchalakani M. Tests of concrete-filled double skin CHS composite stub columns // Steel and Composite Structures. 2002. Vol. 2, No 2. P. 129–146.
23. Численный анализ деформирования, потери и закритического поведения большегабаритных емкостей для автомобильной транспортировки сыпучих грузов / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, М.В. Петров, Д.В. Шошин // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2008. Вып. 70. С. 89–96.
24. Прочность. Устойчивость. Колебания: Справочник. В 3 т. Т. 3 / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 567 с.
25. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. 440 с.

**EXPERIMENTALLY INVESTIGATING THE ELASTOPLASTIC DEFORMATION
AND LOSS OF STABILITY OF STIFFENED CYLINDRICAL SHELLS
WITH A FILLING LOADED IN BENDING**

Ye.G. Gonik, A.I. Kibets, M.V. Petrov, T.G. Fyodorova

Deformation and loss of stability of closed cylindrical shells filled with sand loaded in bending are experimentally investigated. The effect of stiffening ribs on the stability of the shell is analyzed.

Keywords: cylindrical shell, loss of stability, bending, critical loading, stiffening, experimental analysis.