

УДК 539.3

Е. Ф. Прокопало, канд. техн. наук, А. П. Дзюба, д-р техн. наук,

Д. А. Прокопало

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С КРУГОВЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

Приведены результаты экспериментального исследования устойчивости ортотропных цилиндрических оболочек с двумя диаметрально расположенными круговыми отверстиями при воздействии комбинированной нагрузки крутящим моментом и осевой силой. Анализируется докритическое поведение, закритические формы равновесия и зависимость критических нагрузок от размера отверстий.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, цилиндрическая оболочка, круговые отверстия, комбинированное нагружение, устойчивость.

Состояние проблемы. Постановка задачи. Тонкостенные цилиндрические оболочки обладают достаточно прочной конструктивной формой и находят широкое применение в ракетной, авиационной, нефтегазовой, химической, судостроительной и других отраслях техники. Поэтому проблема прогнозирования несущей способности таких тонкостенных конструкций является достаточно важной инженерной задачей.

Довольно часто, по тем или иным конструктивным и эксплуатационным соображениям, в оболочках выполняются одно или несколько отверстий. Наличие отверстий в гладкой цилиндрической оболочке приводит к резкому изменению поля напряжений, в результате чего теоретический анализ задачи существенно усложняется. Это связано с тем, что в процессе нагружения локальная потеря устойчивости оболочки происходит вначале, как правило, в районе отверстий. Причиной чего является концентрация напряжений в окрестности отверстий [1 – 3, 12, 13]. При локальной потере устойчивости несущая способность оболочки не исчерпывается, а появление больших прогибов в области, примыкающей к отверстию и, как следствие, нелинейных составленных в уравнениях устойчивости, создает существенные трудности при теоретическом и численном исследовании явления общей потери устойчивости.

Значительную роль в исследовании этой проблемы играют экспериментальные исследования. Одной из первых в этом направлении была публикация Н. А. Иванкова, В. И. Смыкова и О. Н. Иванова [5], в которой содержатся результаты экспериментального исследования устойчивости стеклопластиковых цилиндрических оболочек, ослабленных одним или двумя диаметрально расположенными отверстиями в средней части при осевом сжатии. Из анализа опытных данных авторы на основе теоретико-экспериментального метода [12] предложили аналитическое соотношение, позволяющее рассчитывать верхнее критическое осевое усилие сжатия для стеклопластиковых оболочек с вырезами. Аналогичные эксперименты были проведены Шульцем [15], исследовавшим устойчивость стеклопластиковой цилиндрической оболочки при осевом сжатии, которые имели в средней части отверстие круговой или квадратной формы. Автор приводит полуэмпирическую зависимость для расчета критической нагрузки сжатия. В работе Коноплева Ю. Г., Тильша А. Л. [7] приводятся результаты экспериментальных исследований устой-

чивости цилиндрических оболочек с круговыми вырезами при действии осевого сжатия, кручения и внешнего давления. Эксперименты проводились на оболочках, изготовленных из триацетатной пленки.

В большинстве работ, посвященных исследованиям устойчивости цилиндрических оболочек с отверстиями [2 – 4, 6, 7, 10, 11], рассматривалось только одно из видов нагружения: сжатие, кручение, внешнее давление и др., в то время как в условиях реальной эксплуатации такие конструктивные элементы подвержены, как правило, одновременному воздействию нескольких нагрузок. Незначительное количество работ, посвященных экспериментальному исследованию устойчивости цилиндрических оболочек с отверстиями при таком комбинированном нагружении, указывает, что решение проблемы все еще далеко от завершения.

Механические характеристики, технология изготовления и геометрия моделей. В качестве материала для изготовления оболочек использовалась чертёжная бумага марки «В» ГОСТ 597-73. Этот материал, как показывают результаты проведенного авторами соответствующего сравнительного анализа, наилучшим образом отвечал целям и задачам эксперимента. При ярко выраженной ортотропии механических свойств указанная чертёжная бумага отличается весьма высокой стабильностью и однородностью показателей упругости и прочности. Ее относительные упругие характеристики (отношение предела текучести к модулю упругости) оказываются даже выше, чем у высококачественных сталей, что расширяет возможности проведения эксперимента в упругой стадии деформирования. Основные механические характеристики этого материала были определены в результате экспериментальных исследований, выполненных как на плоских образцах, так и на оболочках при помощи электромеханической системы, позволяющей проводить достаточно точные измерения, и составляют модули упругости: $E_x = 6,9 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $E_y = 3,45 \cdot 10^9 \text{ Па}$, коэффициенты Пуассона: $\mu_x = 0,3$; $\mu_y = 0,15$. Здесь индексы x и y соответствуют главным направлениям ортотропии бумаги.

Для изготовления оболочек из стандартного листа бумаги вырезались прямоугольные заготовки таким образом, чтобы их стороны были параллельны главным направлениям ортотропии. Одно из главных направлений всегда совпадало с направлением образующей оболочки. На заготовках при помощи высечек пробивались по два круговых отверстия, диаметрально расположенных в среднем поперечном сечении. Диаметр отверстий изменялся в широком диапазоне от $d=15 \text{ мм}$ до $d=30 \text{ мм}$. Затем заготовка склеивалась на металлическом цилиндре клеем БФ-2. Ширина клеевого шва составляла $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Внутренний радиус всех моделей был равен $R=37,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, рабочая длина $L=75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Такая технология обеспечивала в районе отверстий отсутствие визуально заметных остаточных деформаций. Для обеспечения возможности передачи на оболочку поперечных усилий к ее криволинейным кромкам приклеивались металлические торцевые приспособления, имеющие круговое поперечное сечение диаметром $d=75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Граничные условия при таком закреплении оболочки были близки к жесткому защемлению.

Методика проведения испытаний. Испытания проводились на специально разработанной установке, которая давала возможность независимого нагружения оболочки крутящим моментом и сжимающей силой. Схема испытательной установки приведена на рис. 1. Оболочка (1) неподвижно крепилась нижним торцом (2) к массивному основанию (3). Создание момента осуществлялось путем передачи усилия от грузов (8) к оболочке через гибкий тросик (6), проходящий через блок (7), который крепился на скобе (4) и далее на стальную балку (5), которая крепилась к верхнему торцу оболочки. Для создания усилия сжатия к центру верхнего торца крепился жесткий трос (9), на который подвешивались грузы (10). Комбини-

рованное нагружение моделей оболочек крутящим моментом и осевой силой осуществлялось в двух последовательностях. В первом случае (МР), к оболочке поэтапно прикладывался крутящий момент в диапазоне от 0 Нм до $2,32 \text{ Нм}$ с шагом $0,26 \text{ Нм}$, а далее путем увеличения осевой силы оболочка доводилась до потери устойчивости. Во втором случае (РМ) к оболочке прикладывалась осевая сила с шагом $39,2 \text{ Н}$ и далее оболочка доводилась до полной потери устойчивости путем увеличения крутящего момента.

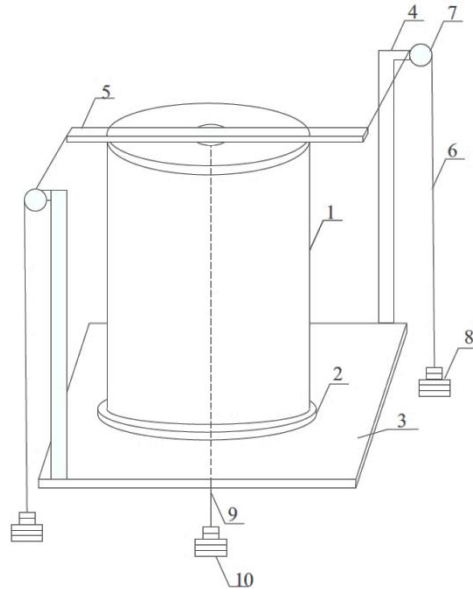


Рис. 1. – Схема испытательной установки

Каждая, номинально геометрически одинаковая модель оболочки с различным размером диаметра двух диаметрально расположенных в среднем сечении оболочки отверстий $d=15, 20, 25, 30 \text{ мм}$, изготавливалась в двух экземплярах и испытывалась по числу ступеней последовательного нагружения. Всего было испытано 160 моделей.

Анализ результатов. При действии на цилиндрическую оболочку с круговыми отверстиями только крутящего момента потеря устойчивости происходила с образованием протяженных наклонных волн (рис. 2, а), а при действии только осевой сжимающей силы волнообразование происходило с образованием ромбовидных вмятин в окружном направлении вблизи среднего поперечного сечения (рис 2, б).



а)



б)

Рис. 2. – Формы потери устойчивости цилиндрических оболочек с круговыми отверстиями при кручении (а) и осевом сжатии (б)

При комбінованому навантаженні, як і следовало очікувати, при малих долах крутячого моменту в соотношеннях навантажок картини формування оболочки практично не відзначалися від хвилювання при осевому стисненні (ромбовидні вмятини). При збільшенні частки крутячого моменту відбувалося витягування і нахил вмятин, характерного формам втрати стійкості при діянні крутячого моменту. По мірі збільшення навантаження внаслідок розвивалися вигинні деформації у країв виріза, згодом починався вигин панелей між отворами, який закінчувався хлопком, свідельствующим про загальну втрату стійкості оболочки. Для малих отворів вмятина, як і у сплошних оболочках [3], розповсюджувалася майже на всю довжину оболонок, а з збільшенням діаметра отворів розмір вмятин при втраті стійкості зменшувався і вони виявлялися практично тільки на панелях між отворами в середній частині. При зворотній послідовності навантаження мала місце аналогічна картина.

Кількість вмятин на оболочках залежало від розміру отворів. Якщо на оболочці з отвором $d = 15$ мм утворювалося вісім вмятин (по чотири між отворами), то при наявності отворів діаметром $d = 30$ мм, втрата стійкості відбувалася з утворенням шести вмятин (рис. 3).

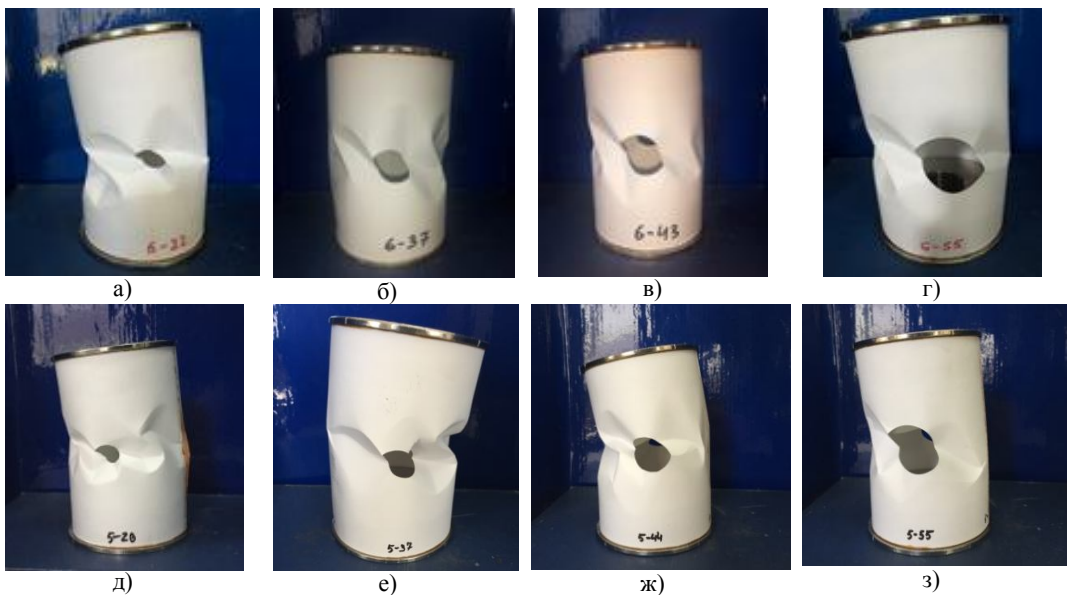


Рис. 3. – Форми втрати стійкості циліндричних оболонок при комбінованому навантаженні крутячим моментом і осевою силою: а – г – в послідовності МР; д – з – в послідовності РМ

На рис. 3,а – рис. 3,г представлені закритичні форми хвилювання оболонок, які спочатку навантажувалися крутячим моментом $M=3,6$ Нм, а потім доводилися до повної втрати стійкості осевою стискаючою силою, критичні значення якої для діаметрів отворів $d=15, 20, 25, 30$ мм становили 235,2 Н, 166,6 Н, 164,15 Н і 127,4 Н, відповідно. На рис. 3,д – рис. 3,з представлені картини хвилювання для оболонок, які внаслідок навантаження осевою силою 196 Н для оболонок з діаметром отворів $d=15$ і 20 мм і силою 147 Н і 117,6 Н при наявності отворів діаметром $d=25$ і 30 мм, відповідно, а потім доводилися до повної втрати стійкості крутячим моментом.

В цілому, в вибраному діапазоні зміни діаметра отворів на боковій поверхні оболочки, як розвиток докритичних деформацій, так і картина

закритического волнообразования, при первичном нагружении осевой силой и последующем добавлением крутящего момента практически не отличалась от картины волнообразования при прикладывании сначала крутящего момента и последующего догружения до полной потери устойчивости осевой сжимающей силой. Незначительные отличия объясняются лишь соотношением нагрузок.

Представленные на рис. 4, рис. 5 результаты испытаний на устойчивость при действии комбинированного нагружения крутящим моментом и осевой сжимающей силой характеризуют зависимость между критическими значениями крутящего момента и осевой сжимающей силой для оболочек с круглыми отверстиями различной величины. Предельная поверхность (область устойчивости) в координатах соответствующих усилий при испытании моделей на комбинированное нагружение «осевой сжимающей силой – крутящим моментом», как и в исследованиях П. Ф. Папковича [9], является выпуклой, а последовательность нагружения, как следует из результатов представленных на рис. 6 для оболочек с диаметром отверстий $d = 15$ мм, не влияет на критические значения одновременного действия крутящего момента и осевой силы.

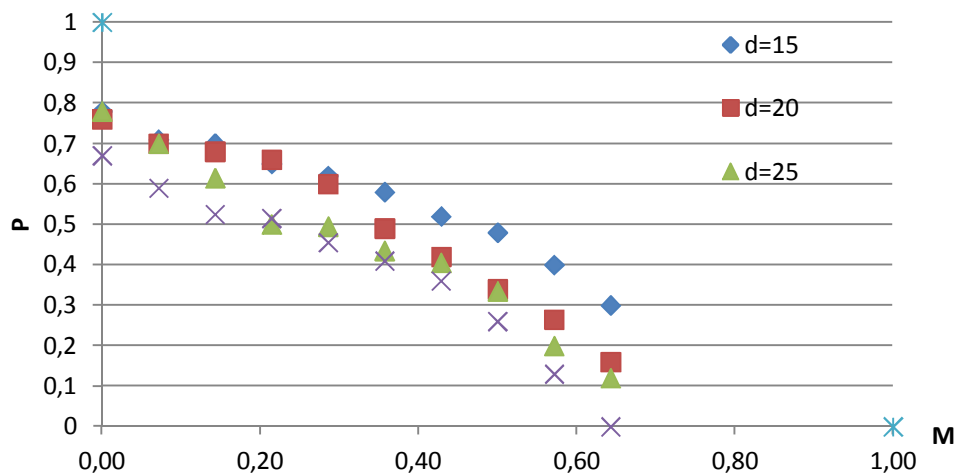


Рис. 4. – Кривые Папковича для оболочек с круглыми отверстиями при действии постоянного момента

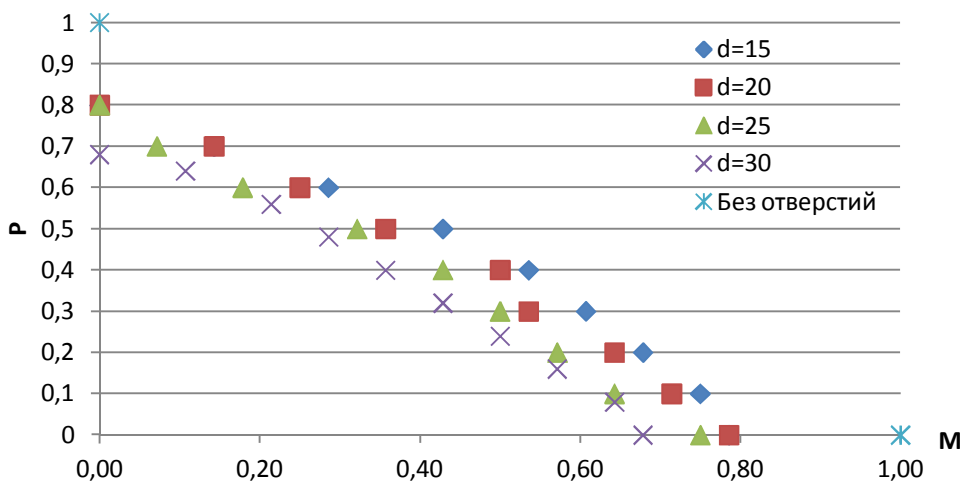


Рис. 5. – Кривые Папковича для оболочек с круглыми отверстиями при действии постоянной осевой силы

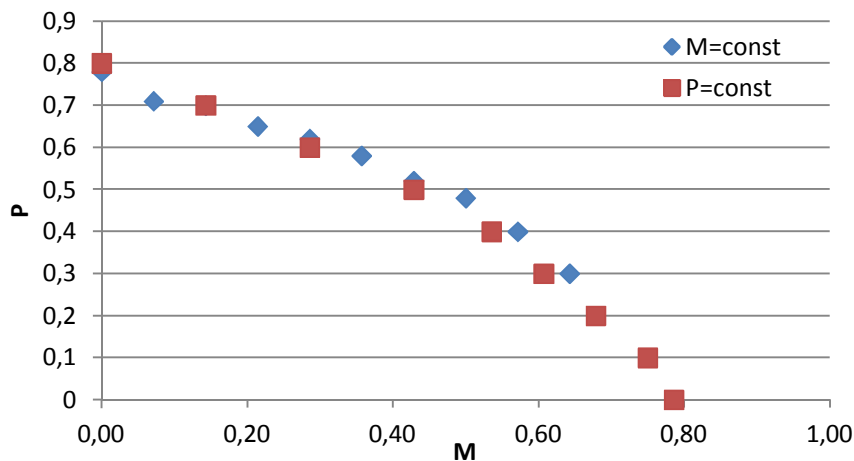


Рис. 6. – Результати испытаний оболонок з отворами діаметром $d=15$ мм, при різній послідовності комбінованого навантаження

Осевые и угловые перемещения верхнего торца оболочки измерялись с помощью индикаторов часового типа. Диаграммы деформирования оболонок при різній послідовності навантаження осевой сжимающей силой и крутящим моментом в целом были подобными. При навантаженні оболонки в докритическом состоянии осевой силой при постоянном крутящем моменте наблюдался рост осевых деформаций при постоянном угле закручивания. С возрастанием крутящего момента и при постоянной осевой силе кроме увеличения угла закручивания наблюдался, хотя и незначительный, рост осевых деформаций.

Выводы. Разработана методика испытаний и приведены результаты экспериментального исследования устойчивости цилиндрической оболочки с двумя круговыми диаметрально расположенными отверстиями различного диаметра при комбинированном навантаженні крутящим моментом и осевой сжимающей силой. Построены кривые П. Ф. Папковича. Исследованы особенности волнообразования при различных последовательностях навантаження. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для соответствующих сравнений, а также как научно-методическая основа и фактические данные при разработке новых более достоверных моделей и методов исследования устойчивости тонкостенных оболонок при комбинированном навантаженні.

Библиографические ссылки

1. Гузь А. Н. Исследования по теории тонких оболонок с отверстиями (обзор) / А. Н. Гузь, И. С. Чернышенко, Вал. Н. Чехов [и др.] // Прикладная механика. – 1979. – Т. 15. – № 11. – С. 3–37.
2. Даревский В. М. Устойчивость цилиндрической оболочки при одновременном действии крутящих моментов и нормального давления / В. М. Даревский // Изв. АН СССР: Отд. техн. н. – 1957. – № 11. – С. 137–147.
3. Дзюба А. П. Несущая способность цилиндрических оболонок с отверстиями: монография / А. П. Дзюба, Е. Ф. Прокопало, П. А. Дзюба – Д.: Лира, 2014. – 224 с.
4. Дзюба П. А. Устойчивость цилиндрических оболонок с квадратными вырезами при осевом сжатии / А. П. Дзюба, Е. Ф. Прокопало // Техническая механика – Д. – 2007 – №2 – С. 101–108.

5. **Иванков Н. А.** Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрической стеклопластиковой оболочки, ослабленной круговым отверстием / Н. А. Иванков, В. И. Смыков, О. Н. Иванов // Тр. Моск. Ин-та хим. машиностроения. – 1975. – № 60. – С. 101–106.
6. **Коноплев Ю. Г.** Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрической оболочки, ослабленной круговым отверстием / Ю. Г. Коноплев // Исследования по теории пластин и оболочек: сб. научн. трудов Казанского ун-та. – 1968. – № 6–7. – С. 262–270.
7. **Коноплев Ю. Г.** Устойчивость цилиндрических оболочек с вырезами при осевом сжатии, кручении и внешнем давлении / Ю. Г. Коноплев, А. Л. Тильш // Сб. аспирантских работ. Теория пластин и оболочек, Казань, Изд-во КГУ. – 1973. – Вып. 3. – С. 3–13.
8. **Лизин В. Т.** Проектирование тонкостенных конструкций: монография / В. Т. Лизин, В. А. Петкин – М.: Машиностроение, 1976. – 708 с.
9. **Папкович П. Ф.** Труды по строительной механике корабля / П. Ф. Папкович – Ленинград. – 1963. – Т. 4. – С. 52–57.
10. **Пискозуб Л. И.** Устойчивость круглых тонкостенных труб со стенками, ослабленными отверстиями, при действии на них равномерного наружного давления / Л. И. Пискозуб // Вестн. Львов. политехн. ин-та, – 1968. – № 25 – С. 88–94.
11. **Прокопало Е. Ф.** Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек с отверстиями при раздельном действии сжимающей силы и кручения / Е. Ф. Прокопало, П. А. Дзюба // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – Д. ДНУ. – 2007. – Вип. 11. – С. 106–114
12. **Савенков А. В.** Теоретико-экспериментальный метод исследования устойчивости пластин и оболочек / А. В. Савенков // Исследования по теории пластин и оболочек: сб. научных трудов Казанского ун-та. – 1968. – № 6 – 7. – С. 391–433.
13. **Савин Г. Н.** К вопросу о концентрации напряжений возле отверстий в цилиндрической оболочке / Г. Н. Савин, А. Н. Гузь // Доп. АН УРСР, 1964. – № 11. – С. 1456–1459.
14. **Чебанов В. М.** Исследование устойчивости тонкостенных оболочек при помощи моделей из бумаги / В. М. Чебанов // Инженерный сборник М.: Институт механики АН СССР. – 1955. – Т. XXII. – С. 68–73.
15. **Schulz U.** Die Stabilität axial belasteter zylinderschalen mit Mantelöffnungen / U. Schulz // Baingenieur, 1976. – Vol. 51. – No 10. – P. 387–396.
16. **Tennusson R. C.** The effects of unzeinforced circular cutouts on the buckling of circular cylindrical shells under axial compression / R. C. Tennusson // Trans. ASME. – 1968. – Vol. 90. – No 4. – P. 541–546.

Надійшла до редколегії 12.05.2017

УДК 539.3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК З КРУГОВИМИ ОТВОРАМИ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Є. Ф. Прокопало, канд. техн. наук, **А. П. Дзюба**, д-р техн. наук,

Д. А. Прокопало

*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара,
Дніпро, Україна*

Наведені результати експериментального дослідження стійкості ортотропних циліндричних оболонок з двома круговими отворами під час впливу комбінованого навантаження круглим моментом і осьювою силою. Аналізуються докритична поведінка, закритичні форми рівноваги та залежність критичних навантажень від розміру отворів.

Ключові слова: експериментальні дослідження, циліндрична оболонка, кругові отвори, комбіноване навантаження, стійкість.

UDC 539.3

EXPERIMENTAL RESEARCH OF STABILITY OF CYLINDRICAL SHELLS WITH CIRCULAR HOLES UNDER COMBINED LOADING

E. F. Prokopalo, PhD (Tech), A. P. Dzyuba, Dr. Sci. (Tech.),
D. A. Prokopalo

*Oles Honchar Dnipropetrovsk National University,
Dnipro, Ukraine*

The results of an experimental study of the stability of orthotropic cylindrical shells with two circular holes under the action of a combined load of the torque and axial force are presented. The analysis of subcritical behavior and postcritical equilibrium shapes and various factors affecting the value of critical efforts is presented.

Keywords: experimental study, cylindrical shell, circular holes, combined loading, stability.

In general, the presented article shows the results of an experimental study of the stability of cylindrical thin-walled shells with two circular diametrically located holes of different diameters under combined loading of torque and compression force. The results were obtained with different loading sequences. In the first case, the cylindrical thin-walled shells with two circular holes were loaded in the sequence of torque then compression force. In the second case, the thin-walled shells were loaded in the reverse order of compression force then the torque. In the article, the waveforms of the thin-walled shells were investigated under various of loading sequences. And also created charts of Papkovich curved line. The lines are convex. Also in the article it was proved that for the cylindrical thin-walled shells with two circular diametrically located holes the load sequence do not affect the critical value of simultaneous action of torque and axial force (Fig. 1). The results can be used as a research basis and evidence in the development of new more reliable models and methods for studying the stability of thin-walled shells under combined loading.

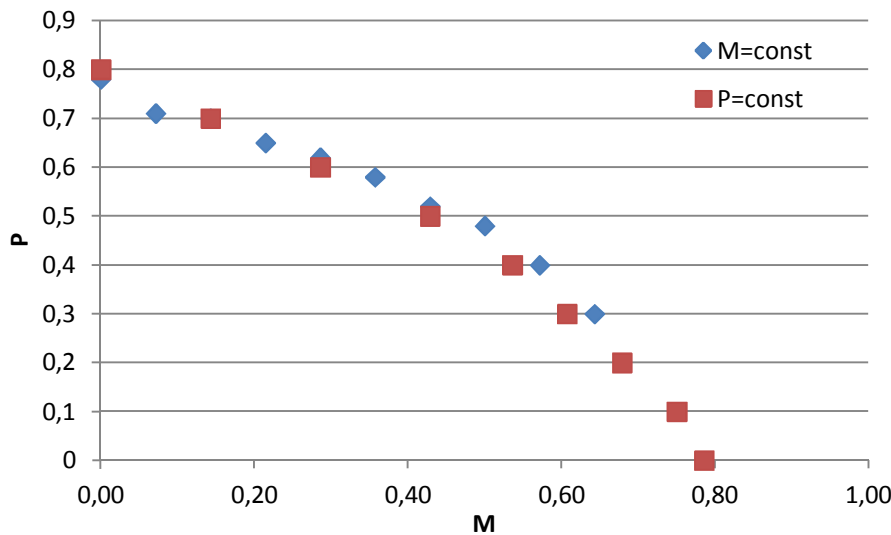


Fig. 1. – The results of an experimental study of the stability shells with two circular holes with diameter $d=15\text{ mm}$ under the different variation of combined loading

References

1. **Guz A. N.** Studies on the theory of thin shells with holes (review) / A. N. Guz, I. S. Chernyshenko, Val. N. Chekhov and others // Applied Mechanics. –1979. – Vol. 15. – No. 11. – P. 3–37. (in Russian).
2. **Darevsky V. M.** Stability of a cylindrical shell with simultaneous action of torque and normal pressure./ V. M. Darevsky // Izv. AH USSR: Department of Technical Science. – 1957. – No. 11.–P. 137–147. (in Russian).
3. **Dzyuba A. P.** Bearing capacity of cylindrical shells with holes / A. P. Dzyuba, E. F. Prokopalo, P. A. Dzyuba // – Dnepropetrovsk: Lira, – 2014, – 224 p. (in Russian).
4. **Dzyuba P. A.** Stability of cylindrical shells with square cuts under axial compression / A. P. Dzyuba, E. F. Prokopalo // Technical mechanics – Dnepropetrovsk, 2007 – No 2 – P. 101–108. (in Russian).
5. **Ivankov N. A.** Experimental study of the stability of a cylindrical fiberglass shell weakened by a circular hole / N. A. Ivankov, V. I. Smykov, O. N. Ivanov // Works of the Moscow institute of Environmental Engineering. – 1975. – No 60. – P. 101–106. (in Russian).
6. **Konoplyov Y. G.** Experimental research of stability of a cylindrical shell weakened by a circular opening / Y. G. Konoplyov // Compil.: Researches in the plates and shells theory. – Kazan. – 1970. – P. 500–503. (in Russian).
7. **Konoplev Yu. G.** Stability of cylindrical shells with cuts under axial compression, torsion and external pressure / Yu. G. Konoplev, A. L. Tilsh // Collection of post–graduate works. The theory of plates and shells, Kazan, KSU Publishing House. –1973. – Iss. 3. – P. 3–13. (in Russian).
8. **Lizin V. T.** Designing of thin–walled structures: monograph / V. T. Lizin, V. A. Petkin – Moscow: Mechanical engineering, – 1976. – 708 p. (in Russian).
9. **Papkovich P. F.** Proceedings of the shipbuilding mechanics / P. F. Papkovich – Leningrad. –1963. – Vol. 4. – P. 52–57. (in Russian).
10. **Piskozub L. I.** Stability of round thin–walled pipes with walls weakened by holes, under uniform external pressure / L. I. Piskozub // Vestn. Lviv Polytechnic Institute. –1968. – No 25. – P. 88–94. (in Russian).
11. **Prokopalo E. F.** Experimental study of the stability of cylindrical shells with holes under separate action of compressive force and torsion./ E. F. Prokopalo, P. A. Dziuba // Problems of the computational mechanics and design. – Dnepropetrovsk: DNU. – 2007 – Iss. 11 – P. 106–114. (in Russian).
12. **Savenkov A.V.** Theoretical and experimental method for studying the stability of plates and shells / A.V. Savenkov // Research on the theory of plates and shells: a collection of scientific works of Kazan University. – 1968. – No. 6–7. – P. 391– 433. (in Russian).
13. **Savin G. N.** To the question of the stress concentration near holes in a cylindrical shell / G. N. Savin, A. N. Guz // Additional. AN URSS. – 1964. – No 11. –P. 1456–1459. (in Russian).
14. **Chebanov V. M.** Investigation of the stability of thin–walled shells using paper models / V. M. Chebanov // Engineering Collection of the Institute of Mechanics of the USSR Academy of Sciences. –1955. –Vol. XXII. –P. 68–73. (in Russian).
15. **Schulz U.** Die Stabilität achse belasteter zylinderschalen mit Mantelöffnungen / U. Schulz // Bauingenieur. – 1976. – Vol. 51. – No 10. – P. 387–396.
16. **Tennusson R. C.** The effects of circular cutouts on the buckling of circular cylindrical shells under axial compression / R. C. Tennusson // Trans. ASME. – 1968. – Vol. 90. – No 4. – P. 541–546.