

УДК 539.3

Белова О. В.<sup>1</sup>, аспирант,  
Дзюба А. П.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.

### Экспериментальное исследование влияния повреждений контура отверстия на устойчивость цилиндрических оболочек при осевом сжатии

В статье обсуждаются результаты экспериментального исследования устойчивости цилиндрических оболочек, нагруженных осевой сжимающей силой и ослабленных двумя квадратными отверстиями, расположенными симметрично относительно среднего поперечного сечения и в окружном направлении. Углы контуров отверстий повреждены прямолинейными разрезами. Исследуется влияние размера отверстия и длины разреза на величину критической силы потери устойчивости оболочки.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, оболочка, квадратное отверстие.

<sup>1</sup> Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, 49044, г. Днепропетровск, просп. Карла Маркса, 35  
e-mail: olga.bielova@gmail.com, dzb@ua.fm

#### Введение

Большинство оболочек, широко применяемых в качестве несущих элементов конструкций в аэрокосмической, судостроительной и других областях машиностроения и строительства, имеют отверстия различной формы и размеров, обусловленных эксплуатационными или технологическими требованиями [1]. Наличие таких отверстий приводит к снижению несущей способности оболочечных конструкций, необходимость прогнозирования величины которой является весьма важной с практической точки зрения. Теоретическое исследование задач определения критических нагрузок таких тонкостенных элементов при наличии концентраторов напряжений в виде отверстий приводит к необходимости решения достаточно серьёзных математических проблем [6]. Трудности исследования потери несущей способности конструкции в этом случае обусловлены существенной неоднородностью напряжённо-деформированного состояния в области отверстия, появлением достаточно больших прогибов и, как следствие, нелинейностью соответствующей математической модели [2, 7].

Сложность решения задач прогнозирования остаточной несущей способности конструкции ещё более увеличивается в связи с возможностью

O. V. Bielova<sup>1</sup>, PhD student,  
A. P. Dzyuba<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Tech.), Prof.

### Experimental research of the effect of damage of the opening's contour on stability of cylindrical shells under axial compression

In the paper the results of the experimental research of the stability of cylindrical shells loaded with axial compressive strength, and weakened by two rectangular openings, arranged symmetrically related to the average cross section and in the circular direction. Corners of the borders of openings are damaged with straight directed slits. Researching slits and openings' size effects on the critical stress of buckling of damaged shells.

Key Words: experimental research, shell, square opening.

<sup>1</sup> Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, 49044, Dnepropetrovsk, ave. Karl Marx, 35  
e-mail: olga.bielova@gmail.com, dzb@ua.fm

появления в процессе эксплуатации дополнительных концентраторов напряжений в виде трещин контура таких отверстий. Одним из немногих эффективных подходов к решению проблемы в этом случае является экспериментальное моделирование поведения оболочек при наличии таких повреждений [5, 8].

#### Описание эксперимента

Объектом исследования в представленной статье является процесс потери несущей способности цилиндрической оболочки с двумя симметрично расположенными по длине и в окружном направлении оболочки квадратными  $a \times a$  отверстиями, углы которых имеют прямолинейные разрезы длиной  $l$ , расположенные на линии диагонали отверстия. Развёртка боковой поверхности исследуемой оболочки представлена на рис. 1. Здесь А и В – зоны приклея заготовки на торцы и шов цилиндрической оболочки шириной  $b_1 = 20 \cdot 10^{-3}$  м и  $b_2 = 6 \cdot 10^{-3}$  м соответственно. Внутренний радиус всех моделей был равен  $R = 37,5 \cdot 10^{-3}$  м, рабочая длина  $L_p = 75 \cdot 10^{-3}$  м. Для передачи на оболочку продольного усилия на криволинейных кромках закреплялись стальные торцы.

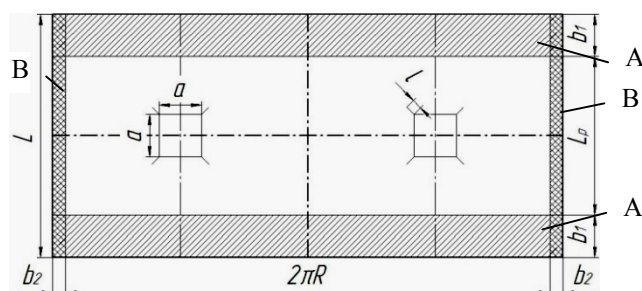


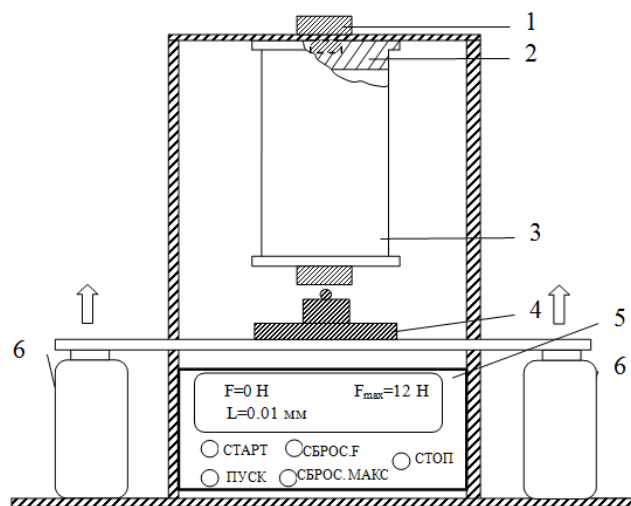
Рис. 1. Схема боковой поверхности оболочки

В качестве материала для изготовления оболочек использовалась чертёжная бумага марки «В» ГОСТ 597-73. Возможность исследования тонкостенных оболочек из специальной бумаги показана Р. В. Роди и Е. Е. Лундквистов [9], позже – В. М. Чебановым [3], а системные исследования проведены Е. Ф. Прокопало [4, 5, 8]. Основные механические характеристики материала: модули упругости  $E_x = 6,9 \cdot 10^9$  Па,  $E_y = 3,45 \cdot 10^9$  Па, коэффициенты Пуассона  $\mu_x = 0,3$ ,  $\mu_y = 0,15$  и пределы прочности  $\sigma_{x,y} = 4,5 \cdot 10^9$  Па,  $\sigma_{y,x} = 3 \cdot 10^9$  Па. Здесь индексы  $x$  и  $y$  соответствуют главным направлениям ортотропии бумаги. Толщина листа составляла  $\delta = 0,23 \cdot 10^{-3}$  м. Более детально механические характеристики и технология изготовления моделей описаны в работе [8].

Каждая модель оболочки изготавливалась в двух экземплярах. В случае, если различие их критических нагрузок превышало заданную погрешность, испытывались дополнительные модели. Контрольная серия сплошных оболочек изготавливалась в количестве пяти экземпляров. Размеры отверстий имели следующие значения:  $a = \{0, 3, 5, 8, 10, 12, 15, 17, 20, 23, 26, 30, 35, 40\}$  мм. Таким образом, для оболочек с величинами разрезов  $l = \{0, 2, 5, 10\}$  мм и сплошных оболочек всего было изготовлено и испытано 109 моделей. Для удобства проведения эксперимента и обработки результатов были сформированы 5 серий оболочек с соответствующими размерами отверстий и длинами разрезов.

Следует заметить, что испытываемые модели имеют сравнительно небольшую критическую нагрузку при осевом сжатии:  $P_{кр}$  сплошной оболочки составляет 646,8 Н. Поэтому достаточно важной является необходимость исключения влияния различных внешних факторов в процессе нагружения, в частности: случайных динамических нагрузок, несоблюдения соосности, нагружения с неравномерной скоростью и другие. Экспериментальные исследования, описанные в работах [4, 5, 8], проводились на испытательных установках, обеспечение нагрузки в которых происходило по схеме мёртвого груза путём после-

довательного ступенчатого нагружения оболочки грузами различной массы, что могло приводить к погрешности определения критической силы. В данной работе, с целью повышения точности измерений результатов эксперимента и упрощения процесса его проведения, для испытания оболочек на действие осевой сжимающей силы была разработана и спроектирована специальная установка, схема которой приведена на рис. 2.



1 – винт, 2 – верхний торец, 3 – модель, 4 – тензодатчик, 5 – блок управления, 6 – поршни

Рис. 2. Установка для испытаний цилиндрических оболочек на осевое сжатие

Прибор представляет собой пневматическую установку с электронным управлением, позволяющую нагружать испытываемую модель продольным сжатием или растяжением с возможностью передачи данных испытаний непосредственно в память ПК. Нагрузка прилагается к образцу путём подачи воздуха из компрессора в симметрично расположенные поршни (6), которые поднимают подвижную платформу с установленным на ней тензодатчиком (4). В ходе проведения эксперимента оболочка (3) соединяется с верхней пластиной с помощью винта (1), обеспечивая жёсткое закрепление образца. Подвижная платформа прилагает к оболочке усилие, поднимаясь вверх под давлением поршней. Конструкция предполагает равномерно распределённое на торец оболочки усилие сжатия-растяжения через металлический шарик, входящий в паз нижнего торца оболочки, так, чтобы соблюдалась соосность нагружения. Установка оснащена электронным блоком управления процессом нагружения (5), который представляет собой дисплей для вывода данных и кнопки управления. Испытательная установка подсоединяется от блока управления к ПК с помощью USB-кабеля.

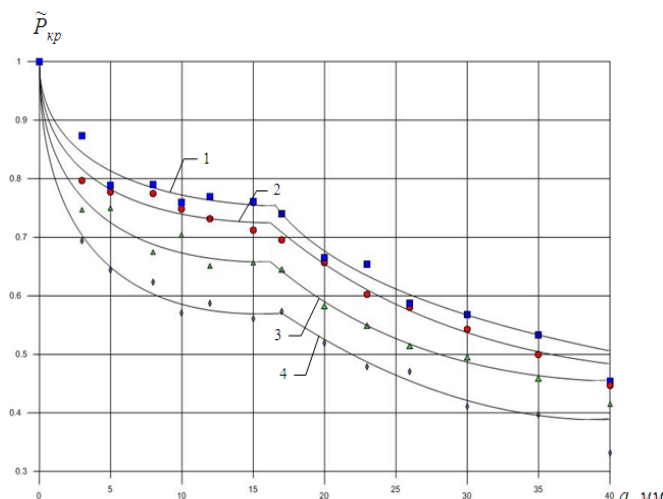


Рис. 3. Зависимость относительной критической нагрузки  $\tilde{P}_{кр}$  от размера отверстий  $a$

### Анализ полученных результатов. Выводы

На рис. 3 представлены данные, отображающие зависимость относительной критической сжимающей силы  $\tilde{P}_{кр}$  от размера квадратного отверстия  $a$ . Здесь  $\tilde{P}_{кр} = P_{кр} / P_{кр}^o$ , где  $P_{кр}$  и  $P_{кр}^o$  – величины критической нагрузки для оболочки с отверстиями и для сплошной оболочки соответственно.

Для обработки результатов исследования и построения аппроксимирующих кривых используется алгоритм квадратичной дискретно-непрерывной аппроксимации, разработанный в [4]. Каждая полученная таким образом аппроксимирующая кривая 1, 2, 3, 4 на рис. 3 соответствует различным значениям критической силы для оболочек с величиной прямолинейного разреза  $l = \{0, 2, 5, 10\}$  мм в направлении диагонали квадратного отверстия, соответственно. Обращает на себя внимание то, что кривые 1-4, полученные для различных длин разрезов, качественно подобны. Это позволяет использовать полученные данные для прогнозирования несущей способности оболочки для различных длин разрезов  $l$ . При этом, как и следовало ожидать, с увеличением длины разреза  $l$  критическая нагрузка снижается. Что же касается влияния размера  $a$  квадратных отверстий, то для всех кривых характерным является неравномерная зависимость  $\tilde{P}_{кр}(a)$ . При этом каждая кривая имеет точку излома в диапазоне  $16 \leq a \leq 18$  мм, представляющую собой стык двух аппроксимирующих линий.

Для оценки количественного влияния отверстий и разрезов на несущую способность оболочек в табл. 1 представлены значения снижения критической нагрузки оболочки  $\Delta\tilde{P}_{кр}^1$  и  $\Delta\tilde{P}_{кр}^2$  в

указанном диапазоне относительно  $P_{кр}^o$  в зависимости от изменения размеров отверстий  $a$  и разрезов  $l$  соответственно.

Снижение критической загрузки Таблица 1

$a$ , мм	$\Delta\tilde{P}_{кр}^1$	$l$ , мм	$\Delta\tilde{P}_{кр}^2$
от 0 до 5	20÷35 %	от 0 до 2	3%
от 5 до 10	3÷5 %	от 2 до 5	5÷8 %
от 10 до 15	1÷2 %	от 5 до 10	10%
от 16 до 40	18÷25%		

Так, появление на оболочках отверстий минимального из исследуемых размера,  $a = 3$  мм, ведёт к существенному падению несущей способности оболочки – снижение критической нагрузки составляет от 13% (для оболочек без поврежденной контура,  $l = 0$ ) до 31% (для длины разреза  $l = 10$  мм). Далее же, увеличение размера отверстия от  $a = 5$  мм до  $a = 15$  мм, приводит к падению  $\tilde{P}_{кр}$  всего на 2,5÷8%. Следует также заметить, что в широком диапазоне от  $a = 17$  мм до  $a = 40$  мм разница между критическими нагрузками для оболочек с различными разрезами и без них составляет 12÷16%. Появление же прямолинейных разрезов длиной  $l = 2$  мм на контурах отверстий приводит к снижению критической нагрузки всего на 3% относительно  $P_{кр}^o$  для оболочек без разрезов с такими же отверстиями ( $a = 3$  мм). Также следует заметить, что наличие разрезов с длинами  $l = \{2, 5, 10\}$  мм приводит к одинаковому снижению  $\tilde{P}_{кр}$  для всех размеров квадратных отверстий – примерно 3%, 10%, 20% соответственно.

Наличие изломов кривых на рис. 3 связано с изменением формы потери устойчивости оболочки. Так, в результате потери устойчивости испытываемые оболочки с величинами отверстий от  $a = 3$  мм до  $a = 15$  мм с прямолинейными разрезами любой из исследуемых длин  $l$  и без них имели практически одинаковые формы потери устойчивости в виде двух ярко выраженных поясов вмятин, расположенных параллельно направляющей оболочки (рис. 4 а, б, в).

В свою очередь, большинство оболочек с величинами отверстий от  $a = 17$  мм до  $a = 40$  мм имели форму потери устойчивости в виде одного пояса вмятин, расположенного параллельно направляющей оболочки (рис. 5 а) или под углом к последней (рис. 5 б, в). Обращает на себя внимание то, что величина прямолинейных разрезов на оболочках с одинаковыми по размеру отверстиями не влияла на формы потери устойчивости, а лишь на величину и глубину вмятин около углов отверстий, являющихся концентраторами напряжений.

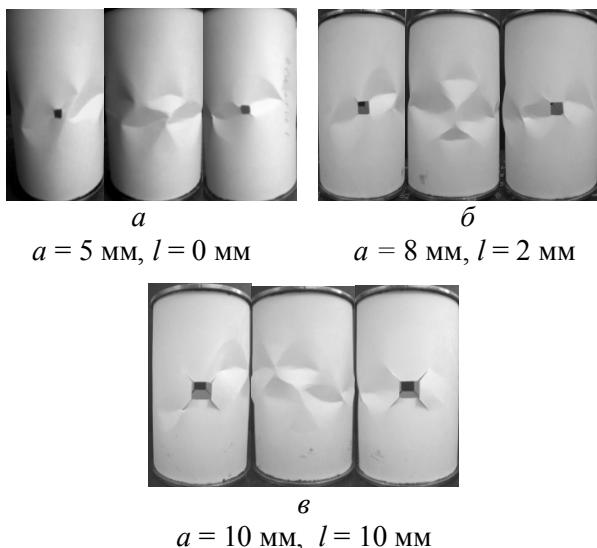


Рис. 4. Формы потери устойчивости оболочки

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие и величина прямолинейных разрезов в направлении диагонали квадратного отверстия снижают несущую способность оболочек для рассмотренных в эксперименте размеров отверстия от  $a = 3$  мм до  $a = 40$  мм примерно равномерно с увеличением длины разреза  $l$  от 1,2 до 2-х раз, в то время как на формы потери устойчивости оболочек увеличение  $l$  не влияет существ-

#### Список использованных источников

1. Ashmarin Y. A. Stability of shells, weakened with openings (review) / Y. A. Ashmarin, A. N. Guz // Applied mechanics. – 1973. – V. IX, N 4. – P. 3-15. (in Russian).
2. Ashmarin Y. O. Nonlinear equations of equilibrium cylindrical shell weakened with circular opening / Y. O. Ashmarin // Rep. AN USSR. – 1971. – Ser. A, N 8. – P. 720-723. (in Ukrainian).
3. Chebanov V. M. Investigation of the stability of thin-walled shells using models from paper / V. M. Chebanov // Engineering Collection. Institute of Mechanics, Academy of Sciences of the USSR. – 1955. – V. XXII. – P. 68-73. (in Russian).
4. Dzyuba P. A. Research and spline-regression analysis of the stability of cylindrical shells weakened by regularly spaced circular openings / P. A. Dzyuba, E. F. Prokopalo // Problems of computational mechanics and strength of structures: coll. of scientific papers. – Dnepropetrovsk: DNU, 2006. – N 10. – P. 27-37. (in Russian).
5. Dzyuba P. A. The stability of cylindrical shells with square cutouts under axial compression / P. A. Dzyuba, E. F. Prokopalo // Technical mechanics. – Dnepropetrovsk, 2007. – N 10. – P. 101-108. (in Russian).

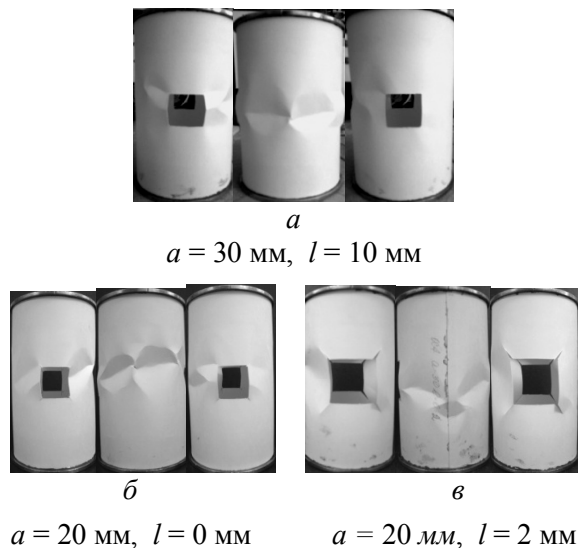


Рис. 5. Формы потери устойчивости оболочки

венно. Зависимость же несущей способности от размеров отверстия является неравномерным. Появление даже малого отверстия резко снижает  $\tilde{P}_{кр}$ , далее следует промежуток сравнительно небольшого влияния увеличения размера  $a$ , и далее, после изменения формы потери устойчивости оболочки (излом кривой), идёт монотонное падение несущей способности с увеличением размеров отверстий.

6. Guz A. N. The stress concentration around the openings in thin shells / A. N. Guz // Applied mechanics. – 1969. – V. V, N 3. – P. 3-17. (in Russian).
7. Konoplyov Y. T. The stability of cylindrical shells with cutouts under axial compression, torsion and external pressure / Y. T. Konoplyov, A. L. Tilsh // Plates and Shells Theory. – Kazan. – 1971. – N 3. – P. 3-13. (in Russian).
8. Prokopalo E. F. The stability of cylindrical shells weakened by randomly distributed rectilinear cuts, under the action of axial compressive force / E. F. Prokopalo, P. A. Dzyuba // Problems of computational mechanics and strength of structures: coll. of scientific papers. – Dnepropetrovsk, 2012. – N 20. – P. 292-299. (in Russian).
9. Rhode R. V. Strength tests on paper cylinders in compression bending and shear / R.V. Rhode, E. E. Lundquist // NASA. Techn. Notc. – 1931. – № 370.

Поступила в редколлегию 14.05.13