

УДК 539.3: 519.876.5

Вивчено спільний вплив технологічних недосконалостей та неоднорідності навантаження на форму закритичного хвилеутворення гладкої циліндричної оболонки. Дослідження проведені методом багатофакторного експерименту

Ключові слова: тонкостінні оболонки, багатофакторний експеримент, хвилеутворення

Изучено совместное влияние технологических несовершенств и неоднородности нагружения на форму закритического волнообразования гладкой цилиндрической оболочки. Исследования проведены методом многофакторного эксперимента

Ключевые слова: тонкостенные оболочки, многофакторный эксперимент, волнообразование

The combined influence of technological imperfections and of non uniform loading on the form of waves of buckling for a smooth cylindrical shell is studied. Investigations were carried out by method of multifactor experiment

Key words: thin-walled shell, multifactor experiment, waves of buckling

О ФОРМАХ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ НЕОДНОРОДНО НАГРУЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ

А.М. Мильцын

кандидат технических наук, профессор
Начальник отдела ТД Днепропетровского завода сварочных материалов*
E-mail: miltsin@bk.ru

В.В. Плетин

инженер-математик
Научный сотрудник ТД Днепропетровского завода сварочных материалов, *49130, Украина, г. Днепропетровск, ул. Мониторная, 2а
Круг научных интересов: теория тонкостенных оболочек.
Контактный тел.: (056) 780-22-08

В.И. Олевский

кандидат технических наук, доцент.
Доцент кафедры компьютерных технологий и высшей математики Государственного ВУЗ Украинский государственный химико-технологический университет, 49000, Украина, г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 8
Контактный тел.: (056) 780-22-07
E-mail: volevnew@gmail.com

Введение

Реальные крупногабаритные оболочки являются сложными конструкциями, форма которых не совпадает с идеальными обводами, а условия нагружения – с условиями, предусмотренными в конструкторской документации. Причиной этого является особенность технологии изготовления, сборки, транспортировки и эксплуатации оболочек. Потеря устойчивости является основной причиной разрушения оболочек, при этом величина критических усилий существенно отличается от расчетной нагрузки. Ранее было показано, что несущая способность тонкостенных цилиндрических оболочек при осевом сжатии зависит от амплитуды начальных несовершенств формы и неоднородности

нагружения [1-7]. Уменьшение величины критических нагрузок при увеличении отдельных несовершенств и соответствующие формы выпучивания детально изучены в работах Бинкевича, Красовского [1], Преображенского, Грищака [3], Гудрамовича [4] и др. в экспериментах на качественных металлических моделях.

Вместе с тем, результаты исследований устойчивости технологически несовершенных и неоднородно нагруженных цилиндрических оболочек на основе многофакторного подхода [4-7] свидетельствуют о том, что взаимодействие параметров неоднородности часто приводит к изменению критических нагрузок по сравнению с однофакторными испытаниями. Это необходимо учитывать при расчетах, вследствие чего возникает необходимость исследования деформиро-

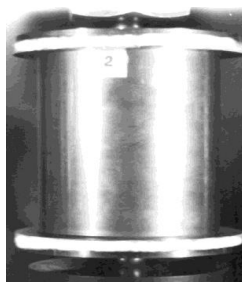
вания оболочек при взаимодействии различных несовершенств и нагрузок.

Методика экспериментальных исследований

Исследования проводились на основе структурно-экстраполяционного анализа [4–8]. Применение многофакторного подхода позволяет корректно решить задачу о нелинейном совместном влиянии несовершенств и параметров неоднородности нагружения на несущую способность конструкции. В экспериментах участвовали тонкостенные оболочки диаметром 0,143 м, толщиной стенки $2,5 \times 10^{-4}$ м и длиной 0,2 м, изготовленные из стали марки Х18Н9-н. Испытания опытных образцов на устойчивость были проведены на машине УМЭ-10ТМ и предложенной в [9] испытательной установке (рис. 1).



а)



б)



в)

Рис. 1. Образец в испытательной машины при комбинированном нагружении (а) и при осевом сжатии (б), образец овально-конической оболочки (в)

На первом этапе изучались формы закритического волнообразования качественных оболочек при действии комбинированных неравномерных нагрузок. Рассматривались комбинации осевого сжатия или поперечной силы с внутренним или внешним давлением (рис. 2).

На втором этапе производился основной многофакторный эксперимент по изучению влияния семи технологических факторов на параметр устойчивости и форму закритического изгиба продольно сжатых цилиндрических оболочек [4–7]. Статистические характеристики изменявшихся в эксперименте факторов приведены в табл. 1. Он производился в соответствии с ядром плана 2^{7-2} , являющегося четверть – репликой полного факторного эксперимента

2⁷. Для принятой дробности плана на основе априорной информации удалось установить, что минимальное число опытов, необходимое для отдельного оценивания линейных факторов и их парных взаимодействий, равно 32. Для определения коэффициентов при нелинейных членах план эксперимента был дополнен до плана второго порядка при общем числе опытов $M = 47$. Таким образом, был получен квазиортогональный центральный композиционный план при варьировании семи активных факторов на пяти уровнях. В табл. 1. также представлены данные наблюдения за восьмым пассивным фактором.

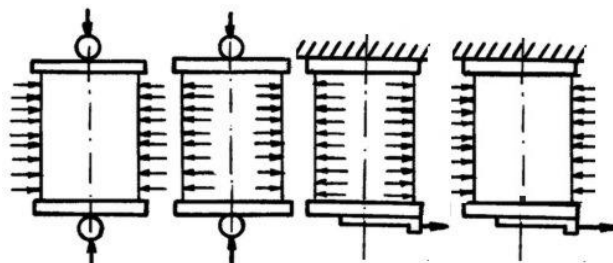


Рис. 2. Схемы приложения нагрузок при комбинированном нагружении оболочек

На третьем этапе для осевого сжатия были реализованы дополнительные двухфакторные эксперименты второго порядка на двух уровнях конусности α и овальности a/b , на двух уровнях овальности нижнего и верхнего торцов при $\alpha = 2^\circ 16'$ (рис. 1в).

Таблица 1

Статистические характеристики факторов

Описание переменных	Условные обозначения	Единица измерения	Среднее значение	Размах
Глубина лунки	w	м	$9,1 \times 10^{-4}$	$3,83 \times 10^{-4}$
Продольная длина лунки	lL	м	$3,3 \times 10^{-2}$	$9,31 \times 10^{-3}$
Поперечная ширина лунки	lφ	м	$2,6 \times 10^{-2}$	$6,90 \times 10^{-3}$
Конусность	α	минуты	96	40
Овальность	a/b	-	0,9	0,039
Амплитуда неплоскостности торца	ΔT	м	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,80 \times 10^{-5}$
Число волн неплоскостности торца	nT	-	12	5
Разнотолщинность	δ _{max} – δ _{min}	м	$3,2 \times 10^{-6}$	$1,50 \times 10^{-6}$

Отдельно производился двухфакторный эксперимент по изучению закритического формообразования при действии периодически неоднородного осевого сжатия на двух уровнях амплитуды неплоскостности торца ΔT и пяти уровнях числа волн неплоскостности nT.

Анализ форм закритического волнообразования

Испытания показали, что исчерпание несущей способности качественных цилиндрических оболочек при действии равномерных нагрузок типа осевого сжатия,

сдвига и внешнего или внутреннего давления происходит резким хлопком путем достижения предельной точки. Формы закритического формообразования представлены на рис. 3 и 4. Хорошо видно, что комбинирование нагрузок, имеющих собственную форму потери устойчивости (осевое сжатие, сдвиг, внешнее давление) приводит к образованию смешанных форм потери устойчивости, сочетающих характерные элементы собственных форм для одиночных нагрузок. Добавление же внутреннего давления приводит к увеличению локальности закритической формы и приближает ее к теоретически определенной бифуркационной форме.

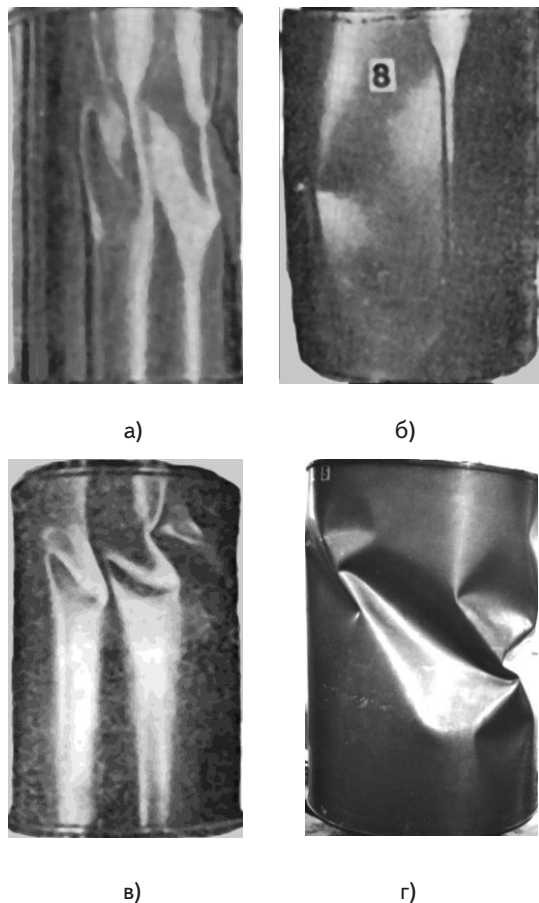


Рис. 3. Форма потери устойчивости при сдвиге (а), равномерном внешнем давлении (б), их взаимодействии (в), и при взаимодействии сдвига с равномерным внутренним давлением (г)

Для оболочек с технологическими несовершенствами потеря устойчивости происходит преимущественно в два этапа – вначале достигается точка бифуркации, затем предельная точка. При этом если форма докритического изгиба близка к закритической по окружной изменямости, то обе точки сливаются, и потеря устойчивости происходит в предельной точке. Особенно это характерно для оболочек с неплоским торцом (рис. 4г).

Концептуально несовершенства представляли собой воздействие возмущений четырех видов – единичной лунки, неплоскостности торца, овальности и

конусности. Поэтому были выделены формы закритического волнообразования, соответствующего формам потери устойчивости оболочек при наличии только этих несовершенств в однофакторных экспериментах [1, 2, 4, 6, 7]. Так для неплоскостности характерно соответствие прогибов числу волн и смещение их к возмущенному торцу (рис. 4г). Для единичной лунки характерно развитие прогиба, близкого к ее первоначальной форме (рис. 5а). Потеря устойчивости овальной цилиндрической оболочки с малой овальностью происходит по общей форме, близкой к собственной форме потери устойчивости при действии равномерного осевого сжатия (рис. 4а), но смещенной на панель меньшей кривизны (рис. 5б). Конусность приводит к смещению формы в направлении большего торца по образующей [2]. Остальные формы рассматривались по степени близости к указанным формам и представлены в процессе развития при увеличении нагрузки на рис. 6.

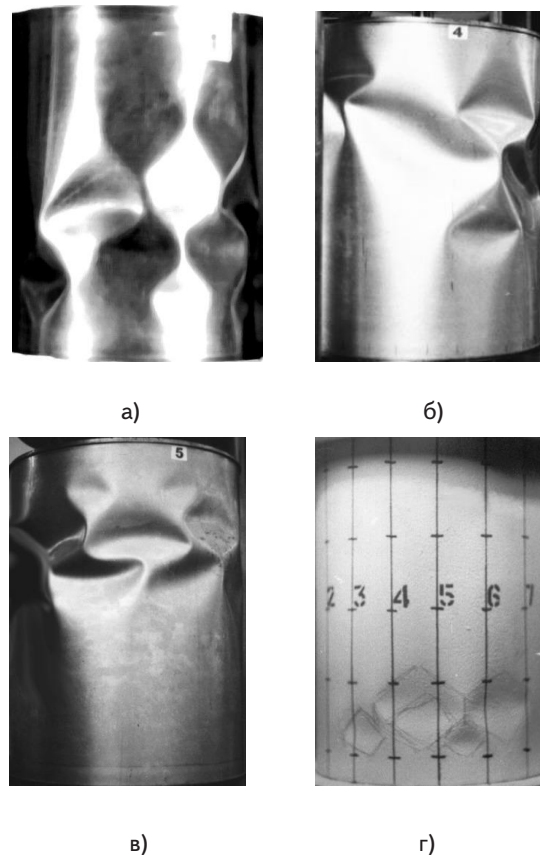
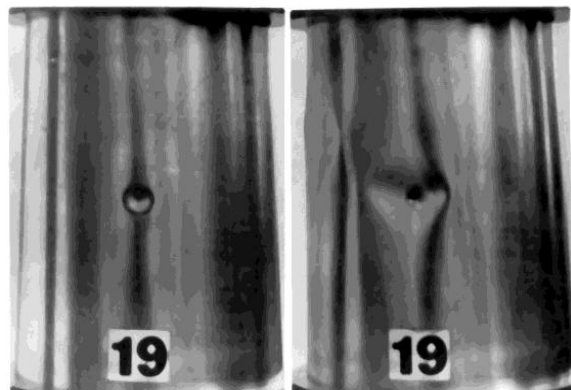
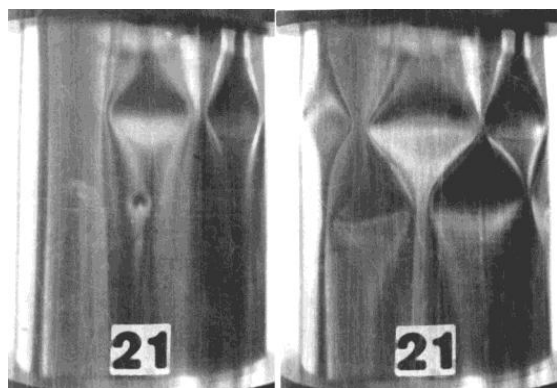


Рис. 4. Форма потери устойчивости оболочки при равномерном осевом сжатии (а), при его взаимодействии с внешним давлением (б), при его взаимодействии с внутренним давлением (в) и при неплоскостности нижнего торца (г)



а)



б)

Рис. 5. Волнообразование, инициированное преимущественно лункой (а) и инициированное преимущественно овальностью (б)

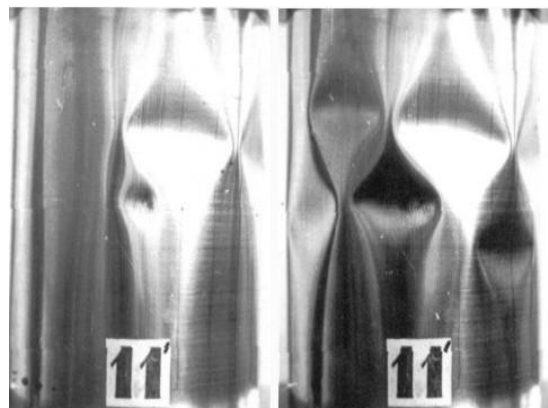
Из анализа рис. 6 хорошо видно, что степень влияния каждого из видов несовершенств на форму закритического волнообразования существенно зависит от соотношения величин факторов. Так неоднородность нагружения и лунка могут инициировать развитие совместного прогиба в зависимости от изменяемости неплоскостности и формы лунки в плане (рис. 6а).

В докритической стадии интенсивные прогибы локализуются отдельно вблизи неплоского торца и лунки, затем происходит бифуркация, положение которой определяется величиной рассматриваемых факторов. Далее, при возрастании нагрузки, происходит прохождение по общей форме, объединяющей бифуркационные локальные прогибы.

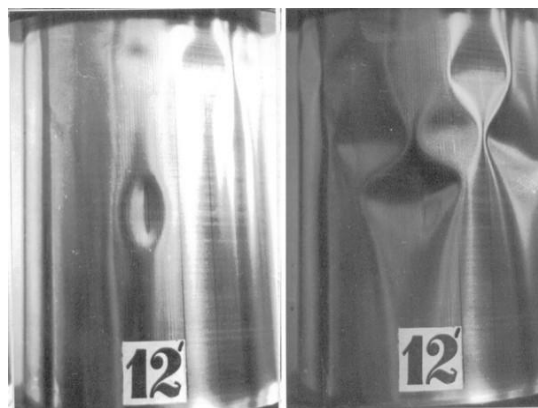
Определенная «конкуренция» наблюдается также и в противодействии формы, навязанной лункой, и характерного прогиба при овальности (рис. 6б).

Более подробно характер потери устойчивости виден при анализе двухфакторных экспериментов [6, 7]. Исчерпание несущей способности овально-конических оболочек (рис. 7) происходит в один этап путем достижения предельной точки с режимом хлопок и образованием общей формы потери устойчивости [7].

Для оболочки с одинаковой малой овальностью торцов (рис. 7а) эта общая форма близка к собственной форме потери устойчивости овальной цилиндрической оболочки при действии равномерного осевого сжатия (рис. 4а), но смещена к большему торцу. На одной стороне оболочки появляются два – три пояса вмятин, расположенных у большего торца. Они охватывают панель меньшей кривизны и распространяются на боковую часть панелей большей кривизны.



а)



б)

Рис. 6. Взаимодействие форм, инициированных лункой и неплоскостностью (а), лункой и овальностью (б)

Локальные вмятины имеют относительно большие размеры и образуют регулярную не замкнутую форму выпучивания. Увеличение конусности и одинаковой овальности торцов приводит к смещению зоны волнообразования в продольном направлении к меньшему торцу (рис. 7б) при сохранении общего характера выпучивания.

При высокой конусности (в пределах данного эксперимента) увеличение овальности нижнего торца при сохранении формы верхнего увеличивает продольную локализацию выпучивания (рис. 7в), смещая вмятины еще ближе к нижнему торцу при сохранении изменяемости в окружном направлении. Наоборот, превалирование при высокой конусности овальности верхнего торца приводит к существенному смещению вмятин к торцу с большей овальностью (рис. 7г).

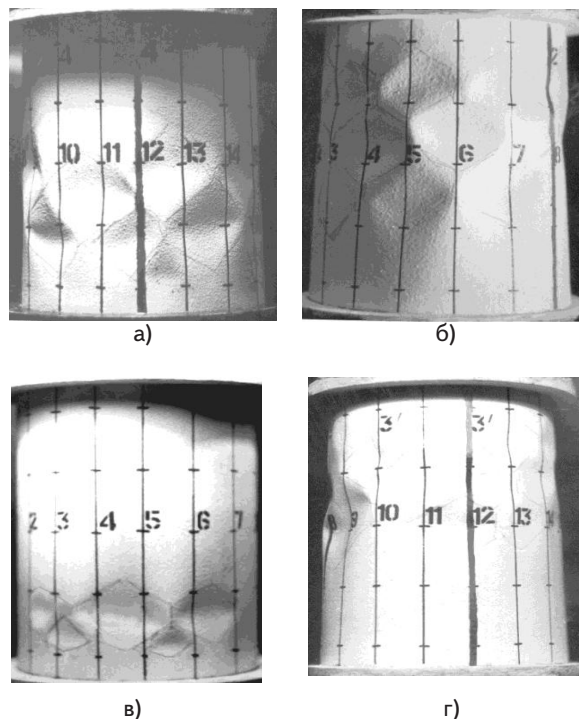


Рис. 7. Взаимодействие форм закритического волнообразования: для оболочки с малой конусностью и одинаковой малой овалностью торцов (а), с большой конусностью и одинаковой большой овалностью торцов (б), с большой конусностью и большей овалностью нижнего торца (в), с большой конусностью и большей овалностью верхнего торца (г)

Выводы

Приведен комплексный анализ, позволяющий получить достоверную экспериментальную оценку формы закритического волнообразования тонкостенных цилиндрических оболочек с комплексом несовершенств при действии комбинированных нагрузок на основе многофакторного подхода. Изучены формы закритического деформирования и их взаимодействие при различных соотношениях параметров несовершенств и нагружения. Установлена существенная неоднородность закритического деформирования таких оболочек и необходимость учета взаимного влияния отдельных несовершенств при определении его формы. Показано, что расчет несущей способности цилиндрической оболочки с комплексом технологических несовершенств в условиях комбинированного нагружения должен учитывать значительную неоднородность закритических перемещений такой конструкции и их зависимость от соотношения амплитуд несовершенств и характера нагрузки.

Проведенный анализ экспериментальных данных может быть использован при построении приближенных аналитических выражений для перемещений конструкции после потери устойчивости.

Литература

1. Бинкевич, Е. В. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек при неоднородном сжатии [Текст] / Е. В. Бинкевич, В. Л. Красовский // Труды VIII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – М.: Наука, 1973. – С. 246 – 249.
2. Преображенский, И. Н. Устойчивость и колебания конических оболочек [Текст]: монография / И. Н. Преображенский, В. З. Гришак. – М., 1986. – 240 с.
3. Гудрамович, В. С. Устойчивость упруго-пластических оболочек [Текст]: монография / В. С. Гудрамович. – К.: Наукова думка, 1987. – 216 с.
4. Мильцын, А. М. Влияние технологических несовершенств на устойчивость тонкостенных оболочек (многофакторный подход) Ч. I [Текст] / А. М. Мильцын. // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1992. – N 6. – С. 181–188.
5. Мильцын, А. М. Нелинейное взаимодействие технологических несовершенств и их влияние на устойчивость тонкостенных оболочек (многофакторный подход) Ч. II [Текст] / А. М. Мильцын. // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1993. – N 1. – С. 178–184.
6. Моссаковский, В. И. Деформирование и устойчивость технологически несовершенных цилиндрических оболочек при неоднородном напряженном состоянии [Текст] / В. И. Моссаковский, А. М. Мильцын, В. И. Олевский // Проблемы прочности. – 1990. – N12. – С.28-32.
7. Мильцын, А. М. Многофакторное исследование продольно сжатых цилиндрических оболочек с технологическими несовершенствами типа конусности и овалности [Текст] / А. М. Мильцын, В. И. Олевский, В. В. Плетин // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2010. – № 14. – С. 254–266.
8. Пилов, П. И. Моделирование и структурно-экстраполяционный анализ в задачах обогащения [Текст]: монография / П. И. Пилов, А. М. Мильцын, В. И. Олевский – Д.: Наука та освіта, 1992. – 174 с.
9. Моссаковский, В. И. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек [Текст]: монография / В. И. Моссаковский, Л. И. Маневич, А. М. Мильцын. – К.: Наукова думка, 1977. – 141 с.