

М. В. Петров, Т. Г. Федорова, Е. Г. Гоник

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, г. Москва

Аннотация. Рассмотрено определения устойчивости образцов при чистом изгибе. Для определения критической силы была собрана установка. По торцам прикладывалась нагрузка. Образцы подбирались из условий геометрического и физического подобия. Критическая нагрузка считалась для пустого и заполненного образцов. По значениям приложенных сил и перемещениям на торце оболочки строились графики зависимости значений сил от перемещений. Приведены эпюры распределения изгибающего момента по образцам. Результаты нижнего критического напряжения для чистого изгиба сверены со значениями, полученными теоретически.

Ключевые слова: устойчивость, оболочка, индикатор, гофры, тензодатчик.

УДК: 539.374.3

В настоящее время транспортировка и хранение сыпучих материалов осуществляется автомашинаами, цистернами, контейнерами. Все данные емкости представляются в виде цилиндрических оболочек. Обеспечение устойчивости данных оболочек во время эксплуатации является одной из ключевых задач[1].

Для исследований поведения оболочек при чистом изгибе был проведен ряд экспериментов. Для осуществления эксперимента была собрана специально разработанная установка, изображенная на рис. 1.

Экспериментальная установка состоит из модельного образца-1, нагружающего устройства-2, измерительных приборов ИЧ-10-3, измерителя деформаций ИДЦ-1-4, тензорезисторов-5.

Типы проведенных испытаний:

1. На цилиндрическую оболочку, опертую на шарнирные опоры с консолями, прикладывалась на концах поперечная нагрузка, направленная вертикально вниз. Образцы без заполнителя. Расчетная схема показана на рис. 2.
2. На цилиндрическую оболочку, опертую на шарнирные опоры с консолями, прикладывалась на концах поперечная нагрузка, направленная вертикально вниз. Образцы с заполнителем. В качестве заполнителя использовался железный порошок ПЖ-5 весом 3200грамм. Расчетная схема показана на рис. 3.

Образцы подбирались из условий геометрического и физического подобия из алюминиевого сплава 3004 или его модификации — алюминиевого сплава 3104 — в состоянии Н19 с параметрами подобия,

Поступила 08.06.2015

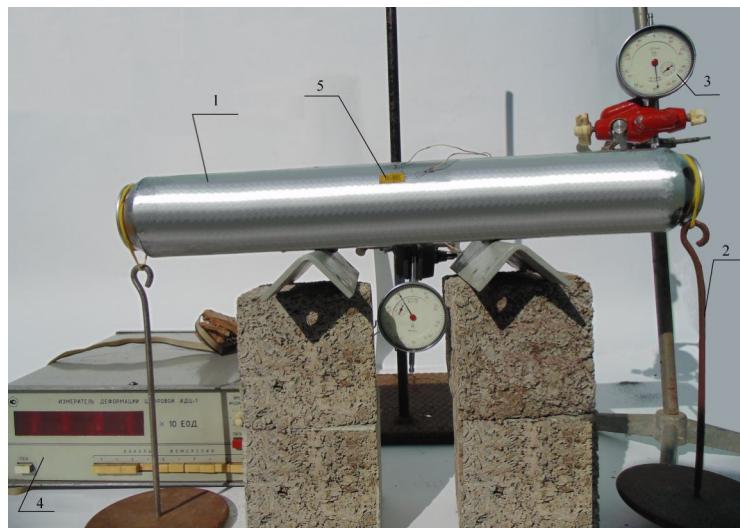


Рис. 1

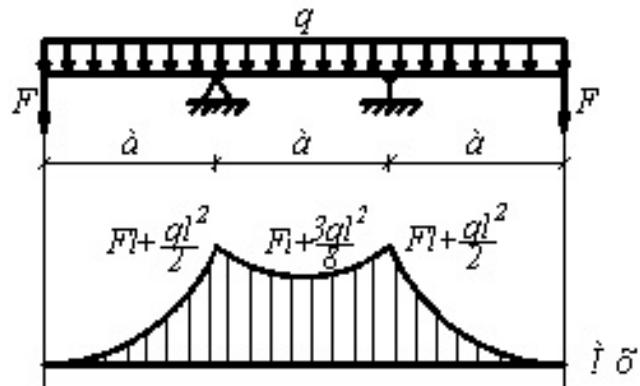


Рис. 2

$$\alpha_1 = \frac{R}{R^*} = 0,02; \quad \alpha_3 = \frac{h}{h^*} = 0,02,$$

где $R^*=1275\text{мм}$, $h^*=5\text{мм}$, радиус и толщина стенки изготавливаемых на заводе цистерн для транспортировки сыпучих грузов.

Каждый образец внимательно изучался. Визуально просматривались несовершенства на поверхности оболочки, отклонения срединной поверхности образца от идеальной цилиндрической поверхности. С целью получения сопоставимых результатов экспериментальных исследований у каждого образца электронным штангенциркулем замерялись наружные диаметры в четырех точках по окружности и толщины стенки. Все образцы были выбраны из одной заводской партии. Партия состояла из 100 образцов, выполненных из алюминиевой ленты по

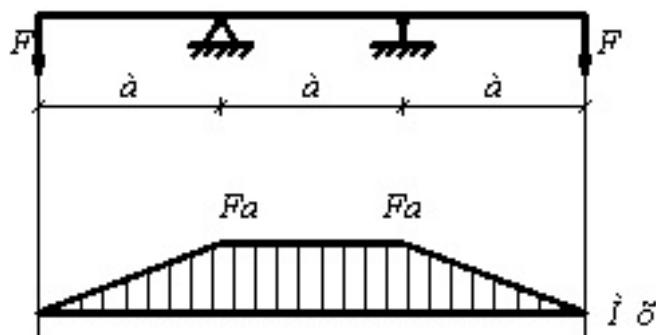


Рис. 3

технологии вытяжки с утоплением. На заводе каждая партия проходила тест на наличие геометрических несовершенств и отклонений от правильной геометрической формы, при помощи светового тестера.

Образцы выполнялись следующих размеров:

- толщина стенки образца $h(t) = (0.10 \pm 0.01)$ мм,
- наружный диаметр образца $D = (65.5 \pm 0.5)$ мм,
- длина образца $L = (435 \pm 1)$ мм,
- отношение длины оболочки к толщине $L/h = 4350$.

Методика испытаний оболочки на устойчивость при изгибе с заполнителем и без заполнителя изложена в работе [1].

Перемещения, возникающие в образцах под действием внешней нагрузки, замерялись индикаторами часового типа ИЧ-10 по ГОСТ 577-68. Его характеристики:

- диапазон измерений: 0-10 мм,
- класс точности: 1,
- цена деления: 0,01 мм.

Диаметры образца в двух направлениях измерялись электронным штангенциркулем Matrix31611, погрешность измерения 0,01мм.

Деформации, возникающие в оболочке, замерялись с помощью тензорезисторов, включенных по полумостовой схеме к измерителю деформаций цифровой ИДЦ-1.

Технические характеристики ИДЦ-1:

- количество измерительных каналов 10,
- сопротивление применяемых тензорезисторов 50-500 Ом,
- основная погрешность не более 20 ЕОД,
- время одного измерения не более 2с,
- цена одной единицы дискретности показаний прибора 10 ЕОД,
- цифровой диапазон измерения $0000 \dots 1999 \times 10^{-7}$ ЕОД ($1 \cdot 10^{-7}$)

Тензорезисторы типа КФ5П1-10-200А-12 наклеивались kleem циакрин- ЭО быстросхватывающимся, холодного отверждения на предварительно очищенную и обезжиренную наружную поверхность в середине оболочки, в предполагаемом месте потери устойчивости. Приклеивались по два теплодатчика в окружном и осевом направлениях в верхней и нижней точках соответственно. Тензорезисторы испытуемых образцов проверялись на целостность цепи. При обнаружении дефектов наклейки тензорезисторы заменялись на новые.

Технические характеристики тензорезистора КФ5П1-10-200А-12:

- полипропиленовая база 10мм,
- номинальное электрическое сопротивление 200 Ом,
- максимальная измеряемая деформация $\pm 3000\text{мкм}/\text{м}$,
- чувствительность $2,1 \pm 0,2$.

Испытание оболочек на устойчивость проводилось постепенно. Вертикальные нагрузки увеличивали с шагом 10Н, приложенными по торцам оболочки. На каждом этапе замерялись показания индикаторов и тензорезисторов, измерялись диаметры оболочки. Нагрузка доводилась до критической, при которой происходит потеря устойчивости оболочки.

Конечная деформированная форма образца фиксировалась с помощью фотоаппарата.

После проведения опытов проводилась статическая обработка результатов. По звячениям приложенных сил и перемещениям на торце оболочки строились графики (рис.4). График(1) для не заполненных сыпучим материалом образцов.

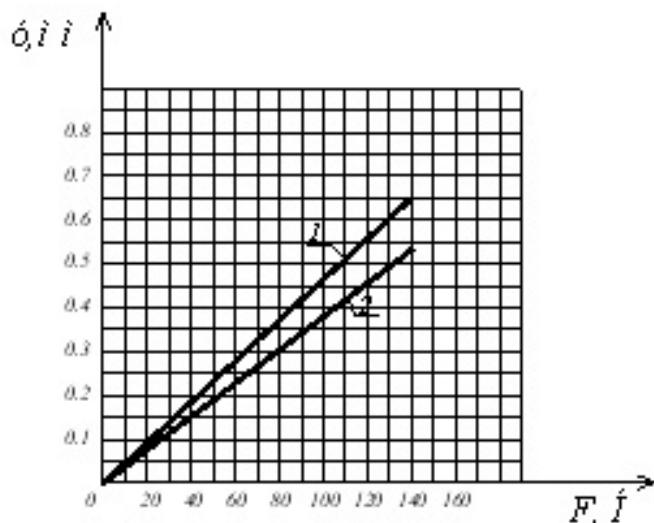


Рис. 4

Значение критической силы, при которой происходит потеря устойчивости, равна 138.3Н. Прогибы, соответственно равны на середине оболочки 0.185мм, на торце 0.65мм.

Гофры образовались в сжатой зоне. Они имеют форму в виде ромба (рис.5). Устойчивость терялась при упругих деформациях образцов.

Для заполненных железным порошком образцов построен график (2) зависимости прогиба на торце образца от приложенных сил (рис. 4). Значение критической силы равно 140Н, прогиб равен 0.53мм. Гофры имеют также форму в виде ромба.

При испытании оболочки с заполнителем в качестве заполнителя использовался железный порошок ПЖ-5, плотностью $2,66\text{г}/\text{см}^3$ и общей массой 3500гр. Среднее значение коэффициента внутреннего трения железного порошка ПЖ-5 равен 0,613. Среднее значение коэффициента трения между материалом образца и железным порошком ПЖ-5 равен 0,364. Процент заполнения 80%. Железный порошок равномерно распределялся внутри образца.

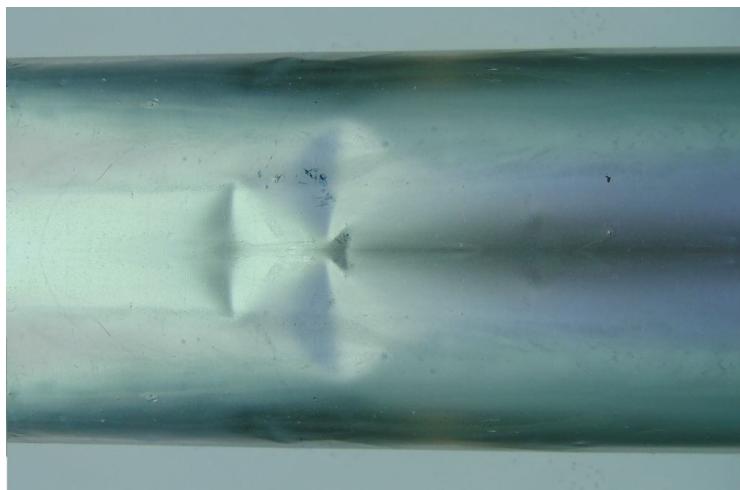


Рис. 5

Для оболочек нижнее критическое напряжение для чистого изгиба определяется по зависимости [2], [3]:

$$\sigma_k^u = 0,3 \frac{Eh}{R} = 0,3 \frac{0,65 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{32,75 \cdot 10^{-3}} = 59,5 \text{ МПа}$$

Для испытанных образцов без заполнителя критическое сжимающее напряжение равно $\sigma_k^u = 64 \text{ МПа}$. Отличие в результатах опытных и расчетных критических напряжений составляет 7%. Результаты сравнительного анализа убеждают в правильности выполненных экспериментальных исследований.

Подводя итоги по проделанным опытам можно сделать следующие выводы:

- образец теряет устойчивость в зоне максимального изгибающего момента;
- значение критической силы, практически одинаковое в обоих случаях;
- гофры имеют одипаковое очертание как при испытании образцов с засыпкой, так и без нее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорова Т. Г. Экспериментально-теоретическое исследование упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения цилиндрических оболочек с сыпучим заполнителем при изгибе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Н. Новгород 2013г.
2. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Издательство : "Наука" главная редакция физико-математической литературы. Москва 1967г.
3. Вольмир А. С., Григорьев Ю. П., Станкевич А. И. Сопротивление материалов. Издательство : Москва, 2007.

Петров Михаил Васильевич,
доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций строительного факультета, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары

Федорова Татьяна Георгиевна,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций
строительного факультета, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова,
г. Чебоксары

Гоник Екатерина Григорьевна,

ассистент кафедры строительных конструкций строительного факультета, Чувашский госу-
дарственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары

M. Petrov, T. G. Fedorova, E. G. Gonick

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE BUCKLING OF THIN-WALLED SHELLS
UNDER PURE BENDING**

Abstract. The method of determining the stability of the samples in pure bending. To determine the critical force was assembled installation. At the ends of the applied load. Samples were selected from the conditions of geometrical and physical similarity. The critical load is considered empty and filled with samples. From the values of the applied forces and displacements at the end of the shell plotted values of forces on displacements. Diagram shows the distribution of the bending moment on the samples. Results of the lower critical stress for pure bending reconciled with the values obtained theoretically.

Keywords: stability, shell, indicator, corrugations, strain gage.

REFERENCES

- [1] Fedorova T. G. Experimental and theoretical investigation of elastic-plastic deformation, buckling and supercritical behavior of cylindrical shells with free-flowing filler during bending. The thesis for the degree of candidate of technical sciences. Nizhny Novgorod 2013.
- [2] Volmir A. S. The stability of deformable systems. Publishing house "Science" major revision of physical and mathematical literature. Moscow 1967.
- [3] Volmir A. S., Grigoriev Y. P., Stankevich A. I. Strength of Materials. Publishing Moscow, 2007.

Petrov, Mikhail Vasilievich

doctor of technical Sciences, Professor of Department of building structures building of the faculty,
Chuvash state University I. N. Ulyanov

Fedorova, Tatyana Georgievna

candidate of technical Sciences, senior lecturer of the Department of building construction and civil
engineering, Chuvash state University I. N. Ulyanov

Gonic, Ekaterina Grigoryevna

assistant Professor of building construction building faculty, Chuvash state University I. N. Ulyanov