

М. В. Петров, Е. Г. Гоник, Б. В. Михайлов

## ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С СЫПУЧИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ НА ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ

*Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия*

**Аннотация.** Экспериментально и теоретически исследовано предельное состояние при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек, имеющих начальные несовершенства геометрии. Изготовлены качественные образцы глубокой вытяжкой в матрице из листа и из трубы точением на токарном станке, имеющие геометрические несовершенства (толщины, диаметров). Материал образцов: алюминиевые сплавы 3004 и Д16Т. Перед испытанием образцы тщательно измерялись и обследовались на наличие дефектов. Изготовлен специальный стенд, к которому жестко одним концом крепились образцы, другой конец был свободным. На свободный конец прикладывалась ступенями поперечная сила до потери устойчивости. Испытывались пустые и заполненные железным порошком образцы. Фиксировались нагрузка и прогиб свободного конца образца индикатором часового типа ИЧ-10. Получены линейные зависимости прогиба от нагрузки, устойчивость терялась в упругости. Численные расчеты выполнялись в программном комплексе «Динамика-3». Для расчетов принимались идеальные образцы. Сопоставив критические нагрузки, полученные экспериментами и численными расчетами, судили о влиянии начальных несовершенств на предельное состояние. Численно рассчитанная критическая сила была всегда больше экспериментального значения. Начальные несовершенства образцов снижали критическую силу от 2,3% до 32,5%. У образцов с небольшими вмятинами в зоне потери устойчивости критическая сила уменьшилась в 1...2 раза. У заполненных железным порошком образцов критическая сила была больше до 40,5%, чем у пустых.

**Ключевые слова:** оболочка, устойчивость, дефекты, сыпучий материал, изгиб, критическая сила, образец.

DOI: 10.37972/chgpu.2020.46.4.001

УДК: 539.3

**Введение.** В строительных, транспортных конструкциях, самолетостроении, кораблестроении используются тонкостенные оболочечные элементы конструкций, которые находятся в сложных напряженных и деформационных состояниях при изгибе, кручении, сжатии, комбинации нагрузений могут потерять устойчивость, что приводит к аварийным ситуациям, к разрушениям.

Много выполнено теоретических и экспериментальных исследований потери устойчивости и закритического поведения пустых тонкостенных оболочек различных видах нагружения [1–15]. Во всех работах не рассмотрены вопросы потери устойчивости при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим наполнителем. В исследованиях отмечается большое расхождение результатов теоретических исследований с результатами экспериментов в два и более раз. Такое большое расхождение результатов объясняется наличием геометрических несовершенств оболочек, которые трудно учесть в теоретических исследованиях.

Классификация начальных несовершенств выполнено в работе [1], где различаются несовершенства, связанные с неоднородностью механических свойств материала, неточностью геометрических размеров, несовершенствами геометрической формы. Многообразие факторов свидетельствует о сложности и трудности исследований, которые снижают несущую способность оболочек. Влияние начальных неправильностей в форме оболочки в случае изгиба должно быть не так велико, как при осевом сжатии [2]. Начальные вмятины в растянутой зоне не должны сказываться сколь-нибудь существенно на поведении оболочки.

Теоретические и экспериментальные исследования потери устойчивости при изгибе и закритическое поведение тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом выполнены в трудах [16–23]. Однако в этих работах не рассмотрено влияние начальных несовершенств оболочек на их предельное состояние, поэтому исследования по этой тематике актуальны.

В данной работе рассмотрено влияние комплекса геометрических несовершенств тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим наполнителем, на их устойчивость при изгибе. Для оценки влияния начальных несовершенств оболочек на их устойчивость использовались относительная разница критических нагрузок, определяемых экспериментами и теоретическими расчетами. Для теоретических расчетов использовался программный комплекс «Динамика-3», аттестованный в научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности [24], Госстандарте РФ [25].

---

© Петров М. В., Гоник Е. Г., Михайлов Б. В., 2020

*Петров Михаил Васильевич*

**e-mail:** rimmametova20@gmail.com, доктор технических наук, профессор, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

*Гоник Екатерина Григорьевна*

**e-mail:** katya.gonik@mail.ru, старший преподаватель, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

*Михайлов Борис Васильевич*

**e-mail:** boris.mihaylov.63@mail.ru, кандидат технических наук, доцент, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Поступила 05.03.2020

Экспериментальные исследования выполнялись на модельных образцах, подобных натурным изделиям, изготавливаемых различными способами. Размеры образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры образцов

Серия образцов	Радиус $R$ , мм	Толщина стенки $h$ , мм	Длина $L$ , мм	$h/R$	$L/R$	Материал образца
1	31,8	0,1	135	0,003	4,12	алюминиевый сплав 3004
2	41,6	0,12	165	0,0029	3,96	алюминиевый сплав 3004
3	41,2	0,42	171	0,01	4,15	сплав Д16Т
4	41,2	0,42	348	0,01	8,3	сплав Д16Т

Образцы первой и второй серии изготавливались из листов глубокой вытяжкой в матрице, поэтому они получились качественными. Образцы третьей и четвертой серий изготавливались из трубы за одну установку точением на токарном станке по наружной и внутренней поверхностям. Образцы тщательно обследовались на наличие дефектов. Геометрические размеры измерялись штангенциркулем с цифровым отсчетным устройством с точностью до 0,01 мм. Толщина стенки образцов измерялись микрометром с точностью до 0,001 мм. Наличие вмятин на наружной поверхности образцов проверялось световым тестером. Разброс толщины стенки образцов первой и второй серии было в пределах 0,01 мм, третьей и четвертой серии — в пределах 0,02 мм. Диаметры образцов первой и второй серий отличались до 0,1 мм, третьей и четвертой серий отличались до 0,25 мм. На некоторых образцах первой серии специально создавались вмятины глубиной до 0,1 мм в предполагаемой зоне потери устойчивости.

Для выполнения экспериментов был изготовлен специальный стенд, который позволял консольно закреплять образцы. Один конец образцов жестко защемлялся, а другой конец был свободным. На свободный конец образца прикладывалась сосредоточенная поперечная сила. Производилось ступенчатое нагружение через 10 Н, при приближении к моменту потери устойчивости нагружали по 1 Н и менее. На каждой ступени нагружения фиксировали усилие, прогиб свободного конца индикатором часового типа ИЧ-10. Испытывали по 10–15 образцов каждой серии, производилась статистическая обработка результатов. Испытывались пустые образцы и заполненные на 90% объема железным порошком. В табл. 2 приведены результаты экспериментов и численных расчетов критических сил. Численные расчеты выполнялись для образцов идеальных размеров, поэтому, сравнивая критические нагрузки, полученные из экспериментов и численных расчетов, сделали выводы о влиянии дефектов на предельное состояние.

Потеря устойчивости образцов происходила в зоне упругости, зависимость прогиба  $d$  от нагрузки линейная.

Из табл. 2 видно, что критическая сила для образцов, заполненных сыпучим материалом, значительно больше, чем для пустых образцов. Для образцов первой, второй, третьей, четвертой серий критическая сила увеличилась на 40,5%, 16,9%, 26,3%, 12,3% соответственно. Критическая сила, полученная численным расчетом, всегда больше, чем экспериментальное значение вследствие влияния различных дефектов образцов,

Таблица 2. Результаты экспериментов и численных расчетов критических сил

Серия образцов	Процент заполнения образца, %	Критическая сила $F_{cr}$ , кН		Отличие $F_{cr}$ , %	Увеличение $F_{cr}$ для заполненного образца, %
		эксперимент	численный расчет		
1	0	0,153	0,16	4,5	
	90	0,215	0,223	3,7	40,5
2	0	0,262	0,269	2,7	
	90	0,341	0,349	2,3	16,9
3	0	1,77	2,21	25	
	90	2,235	2,7	20	26,3
4	0	0,83	1,1	32,5	
	90	0,932	1,20	28,75	12,3

ошибок эксперимента. Начальные несовершенства образцов снижали критическую силу от 2,3% до 32,5%. Для качественно изготовленных образцов первой и второй серии критические силы отличаются незначительно. У образцов первой серии с начальными небольшими вмятинами в зоне потери устойчивости критическая сила уменьшилась в 1...2 раза.

Выводы:

- 1) начальные несовершенства тонкостенных оболочек при изгибе всегда снижают значение критической нагрузки;
- 2) для заполненных сыпучим материалом образцов влияние начальных дефектов на устойчивость меньше, чем для пустых образцов;
- 3) тонкостенные оболочечные элементы различных конструкций необходимо изготавливать очень качественно, отбраковывать элементы, имеющие какой-либо дефект.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Моссаковский В. И., Маневич Л. И., Мильцын А. М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. Киев: Наукова Думка, 1977. 141 с.
- [2] Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Москва: Наука, 1967. 984 с.
- [3] Григолюк Э. И., Кабанов В. В. Устойчивость оболочек. Москва: Наука, 1978. 360 с.
- [4] Саченков А. В. О локальной устойчивости оболочек // Изв. Казан. филиала АН СССР. Сер. физ.-мат. и техн. наук. 1960. № 14. С. 35–42.
- [5] Коноплев Ю. Г. Экспериментальное исследование задачи о действии сосредоточенной силы на цилиндрическую оболочку // Исследования по теории пластин и оболочек. 1966. № 4. С. 83–90.
- [6] Ильгамов М. А. Экспериментальное исследование устойчивости консольно закрепленной цилиндрической оболочки под действием поперечной силы и внутреннего давления // Исследования по теории пластин и оболочек. 1964. № 2. С. 186–191.
- [7] Саченков А. В. Теоретико-экспериментальный метод исследования устойчивости пластин и оболочек // Исследования по теории пластин и оболочек. 1970. № 6/7. С. 391–433.
- [8] Бойко Д. В., Железнов Л. П., Кабанов В. В. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости овальных цилиндрических оболочек при комбинированном нагружении изгибающим и крутящим моментами // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2007. № 3. С. 3–7.
- [9] Mathon C., Limam A. Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending // Thin-Walled Structure. 2006. Vol. 44. P. 39–50.
- [10] Li L.-Y., Kettle R. Nonlinear bending response and buckling of ring-stiffened cylindrical shells under pure bending // Int. Journal of Solids and Structures. 2002. Vol. 39, no. 3. P. 765–781.

- [11] Brazier L. G. On the flexure of thin cylindrical shells and other “Thin” Sections // Proceedings of the Royal Society. Vol. 116(773) of A. 1927. P. 104–114.
- [12] Chen L., Doerich C., Rotter J. M. A study of cylindrical shells under global bending in the elastic-plastic range // Steel Construction — Design and Research. 2008. Vol. 1, no. 1. P. 59–65.
- [13] Houliara S., Karamanos S. Stability of long transversely-isotropic elastic cylindrical shells under bending // Int. Journal of Solids and Structures. 2010. Vol. 47. P. 10–24.
- [14] Rotter J. M., Sadowski A. J., Chen L. Nonlinear stability of thin elastic cylinders of different length under global bending // Int. Journal of Solids and Structures. 2014. Vol. 51. P. 2826–2839.
- [15] Nonlinear behaviour of short elastic cylindrical shells under global bending / O. K. Fajuyitan, A. J. Sadowski, M. A. Wadee et al. // Thin-Walled Structures. 2018. Vol. 124. P. 574–587.
- [16] Петров М. В., Федорова Т. Г., Гоник Е. Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 2(24). С. 119–125.
- [17] Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending / V. G. Bazhenov, E. G. Gonik, A. I. Kibets et al. // Materials Physics and Mechanics. 2016. Vol. 28. P. 16–20.
- [18] Гоник Е. Г., Федорова Т. Г. Конечно-элементное моделирование взаимодействия упругопластического сыпучего наполнителя с оболочкой при изгибе // Тез. докл. V Междунар. научн. семинара “Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы” / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016. С. 51–53.
- [19] Исследование упругопластического изгиба и потери устойчивости оболочек вращения с учетом контактного взаимодействия с сыпучим наполнителем / Е. Г. Гоник, А. И. Кибец, М. В. Петров [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики и конструкций и сплошных сред: мат. XXIII Междунар. симп. им. А. Г. Горшкова. 2017. С. 57–59.
- [20] Влияние геометрических размеров тонкостенных оболочек, заполненных сыпучим материалом, на устойчивость при изгибе / Е. Г. Гоник, М. В. Петров, Т. Г. Федорова [и др.] // Мат. X Всеросс. конф. по механике деформируемого твердого тела. 2017. С. 170–173.
- [21] Влияние несовершенств геометрии тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, на их устойчивость при изгибе / М. В. Петров, Т. Г. Федорова, Б. В. Михайлов [и др.] // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: Мат. IV Междунар. (X Всеросс.) конф. НАСКР-2018. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 148–156.
- [22] Способ приближенного расчета на устойчивость при поперечном изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек средней длины, заполненных сыпучим материалом / М. В. Петров, Т. Г. Федорова, Е. Г. Гоник [и др.] // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. 2018. № 4(38). С. 120–128.
- [23] Гоник Е. Г., Петров М. В. Расчет предельного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек при изгибе, заполненных сыпучим наполнителем // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. 2019. № 2(40). С. 117–127.
- [24] Вычислительный комплекс “Динамика-3”. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС№325 от 18.04.2013.
- [25] Программный продукт “Пакет прикладных программ для решения трехмерных задач нестационарного деформирования конструкций, включающих массивные тела и оболочки, “Динамика-3” (ППП “Динамика 3”): Сертификат соответствия Госстандарта России № РОССТУ.МЕ20.Н00338.

M. V. Petrov, E. G. Gonik, B. V. Mikhailov

## INFLUENCE OF INITIAL IMPERFECTIONS OF THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS WITH LOOSE AGGREGATE ON THEIR BENDING STABILITY

*Chuvash state University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia*

**Abstract.** The limit state for bending thin-walled cylindrical shells with initial geometry imperfections has been studied experimentally and theoretically. High-quality samples are made by deep drawing in a matrix from a sheet and from a pipe by turning on a lathe, which have geometric imperfections (thickness, diameter). The material of the samples is aluminum alloys 3004 and D16T. Before testing, the samples were carefully measured and examined for defects. A special stand was made, to which samples were rigidly attached at one end, while the other end was free. A transverse force was applied to the free end in steps until it lost stability. Empty and iron-powder-filled samples were tested. The load and deflection of the free end of the sample were recorded by an ICH-10 clock type indicator. Linear dependences of the deflection on the load were obtained; stability was lost in elasticity. Numerical calculations were performed in the Dynamics-3 software package. Ideal samples were taken for calculations. Comparing the critical loads obtained by experiments and numerical calculations, we judged the effect of initial imperfections on the limit state. The numerically calculated critical force was always greater than the experimental value. Initial imperfections of the samples reduced the critical force from 2.3% to 32.5%. For samples with small dents in the zone of loss of stability, the critical force decreased by 1.2 times. In iron powder-filled samples, the critical force was greater by up to 40.5% than in empty samples.

**Keywords:** shell, stability, defects, bulk material, bending, critical force, sample.

### REFERENCES

- [1] Mossakovsky V. I., Manevich L. I., Miltsyn A. M. Modeling the bearing capacity of cylindrical shells. Kiev: Naukova Dumka, 1977. 141 p. (in Russian).
- [2] Vol'mir A. S. Stability of deformable systems. Moscow: Nauka, 1967. 984 p. (in Russian).
- [3] Grigolyuk E. I., Kabanov V. V. Stability of shells. Moscow: Nauka, 1978. 360 p. (in Russian).
- [4] Sachenkov A. V. On the local stability of shells // *Izv. Kazan. branch of the USSR Academy of Sciences. Ser. Phys.-Mat. and tech. sciences*. 1960. no. 14. P. 35–42. (in Russian).
- [5] Konoplev Y. G. Experimental study of the problem of the action of a concentrated force on a cylindrical shell // *Research on the theory of plates and shells*. 1966. no. 4. P. 83–90. (in Russian).
- [6] Ilgamov M. A. Experimental study of the stability of a cantilevered cylindrical shell under the action of a transverse force and internal pressure // *Research on the theory of plates and shells*. 1964. no. 2. P. 186–191. (in Russian).
- [7] Sachenkov A. V. Theoretical and experimental method for studying the stability of plates and shells // *Research on the theory of plates and shells*. 1970. no. 6/7. P. 391–433. (in Russian).
- [8] Boyko D. V., Zheleznov L. P., Kabanov V. V. Investigation of nonlinear deformation and stability of oval cylindrical shells under combined loading by bending and torques // *News of higher educational institutions. Aviation equipment*. 2007. no. 3. P. 3–7. (in Russian).

---

*Mikhail Vasilyevich Petrov*, Doctor of Engineering, Professor, Chuvash state University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia.

*Ekaterina Grigoryevna Gonik*, Senior Lecturer, Chuvash state University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia.

*Boris Vasilyevich Mikhailov*, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Chuvash state University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia.

- [9] Mathon C., Limam A. Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending // *Thin-Walled Structure*. 2006. Vol. 44. P. 39–50.
- [10] Li L.-Y., Kettle R. Nonlinear bending response and buckling of ring-stiffened cylindrical shells under pure bending // *Int. Journal of Solids and Structures*. 2002. Vol. 39, no. 3. P. 765–781.
- [11] Brazier L. G. On the flexure of thin cylindrical shells and other “Thin” Sections // *Proceedings of the Royal Society*. Vol. 116(773) of *A*. 1927. P. 104–114.
- [12] Chen L., Doerich C., Rotter J. M. A study of cylindrical shells under global bending in the elastic-plastic range // *Steel Construction — Design and Research*. 2008. Vol. 1, no. 1. P. 59–65.
- [13] Houliara S., Karamanos S. Stability of long transversely-isotropic elastic cylindrical shells under bending // *Int. Journal of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47. P. 10–24.
- [14] Rotter J. M., Sadowski A. J., Chen L. Nonlinear stability of thin elastic cylinders of different length under global bending // *Int. Journal of Solids and Structures*. 2014. Vol. 51. P. 2826–2839.
- [15] Nonlinear behaviour of short elastic cylindrical shells under global bending / O. K. Fajuyitan, A. J. Sadowski, M. A. Wadee et al. // *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 124. P. 574–587.
- [16] Petrov M. V., Fedorova T. G., Gonik E. G. Experimental study of the loss of stability of thin-walled shells under pure bending // *Bulletin of the Chuvash state pedagogical University named after I. ya. Yakovlev. Series: Mechanics of a limit state*. 2015. no. 2(24). P. 119–125. (in Russian).
- [17] Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending / V. G. Bazhenov, E. G. Gonik, A. I. Kibets et al. // *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. P. 16–20.
- [18] Gonik E. G., Fedorova T. G. Finite element modeling of the interaction of an elastic-plastic bulk filler with a shell during bending // *Abstracts of reports V Int. scientific seminar “Dynamic deformation and contact interaction of thin-walled structures under the influence of fields of different physical nature” / Moscow aviation Institute (national research University)*. 2016. P. 51–53. (in Russian).
- [19] Investigation of elastic-plastic bending and loss of stability of the shells of rotation, taking into account contact interaction with a loose aggregate / E. G. Gonik, A. I. Kibets, M. V. Petrov et al. // *Dynamic and technological problems of mechanics and structures and continuous media: materials of the XXIII Int. Symposium is named after A. G. Gorshkov*. 2017. P. 57–59. (in Russian).
- [20] Influence of geometric dimensions of thin-walled shells filled with bulk material on bending stability / E. G. Gonik, M. V. Petrov, T. G. Fedorova et al. // *Proceedings of the X all-Russian conference on deformable solid mechanics*. 2017. P. 170–173. (in Russian).
- [21] Influence of imperfections in the geometry of thin-walled cylindrical shells filled with bulk material on their bending stability / M. V. Petrov, T. G. Fedorova, B. V. Mikhailov et al. // *New in architecture, design of building structures and reconstruction: materials of the IV International (X all-Russian) conference NASKR-2018. Cheboksary: Publishing house of the Chuvash. University’s, 2018. P. 148–156. (in Russian)*.
- [22] Method for approximate calculation of stability under transverse bending of thin-walled cylindrical shells of medium length filled with bulk material / M. V. Petrov, T. G. Fedorova, E. G. Gonik et al. // *Bulletin of ChGPU named after I. Ya. Yakovlev. Series: Mechanics of a limit state*. 2018. no. 4(38). P. 120–128. (in Russian).
- [23] Gonik E. G., Petrov M. V. Calculation of the limit state of thin-walled cylindrical shells filled with loose aggregate during bending // *Bulletin of ChGPU named after I. Ya. Yakovlev. Series: Mechanics of a limit state*. 2019. no. 2(40). P. 117–127. (in Russian).
- [24] Computer complex “Dynamics-3”. Scientific and technical center for nuclear and radiation safety. Certification passport of the software. Registration passport of certification PS No. 325 dated 18.04.2013. (in Russian).
- [25] Software product “Package of application programs for solving three-dimensional problems of non-stationary deformation of structures including massive bodies and shells, “Dynamics-3” (SPP “Dynamics 3”): Certificate of conformity of the state standard of Russia no. ROSRU.ME20.H00338. (in Russian).