

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК*

© 2018 г. **Баженов В.Г.¹, Рябов А.А.², Птицын С.О.²**

¹*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*
²*Саровский инженерный центр, Нижегородская обл., Дивеевский район,
Сатис, Российская Федерация*

Alex.ryabov@saec.ru

Поступила в редакцию 01.02.2018

Численно и экспериментально исследуется упругопластическая динамическая потеря устойчивости и закритические деформации удлиненной цилиндрической оболочки при осевом ударном сжатии. Компьютерное моделирование деформирования оболочки проводится на основе метода конечных элементов и явной схемы интегрирования по времени, программно реализованных в комплексе LS-DYNA. Уравнения состояния материала оболочки формулируются в рамках теории течения с изотропным упрочнением. Для решения задачи разработан ряд дискретных моделей размерностью от 2,5 до 340 тыс. твердотельных и оболочечных конечных элементов. Численные эксперименты показывают, что лучшее согласие с экспериментами демонстрируют дискретные модели на основе четырехузловых оболочечных элементов с билинейными функциями формы Belitschko, Lin, Tsay, имеющие размеры 1×1 мм.

Приводится анализ характерных особенностей процесса деформирования в условиях сложного нагружения при переходе в закритическую область. Достоверность численных результатов подтверждается их близостью с экспериментальными данными по изменению торцевой ударной нагрузки и характерным размерам деформированной оболочки. Отмечается, что в результате ударного нагружения оболочка теряет устойчивость с образованием в области верхнего торца двух кольцевых и одной неосесимметричной складок. С наружной стороны оболочки на гребнях двух первых складок заметно разрыхление материала, однако макротрещины отсутствуют. Расчеты показывают, что на формирование первой складки расходуется 51% кинетической энергии ударника, на образование второй – 28%, а на третью складку тратится 21%. Исследован вид напряженно-деформированного состояния в области складкообразования. Установлено, что в девиаторном пространстве А.А. Ильюшина при пластическом выпучивании оболочки траектории деформаций в характерных точках имеют большие углы излома. На поверхности складок в зонах

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-08-00972-а).

двухосного растяжения углы излома траекторий превышают 90° при упругой разгрузке. В зонах двухосного сжатия траектории имеют малую и среднюю кривизну. Показано, что при сложном нагружении в отдельных локальных зонах оболочки теория течения позволяет с приемлемой точностью описывать интегральные силовые и кинематические параметры процесса упругопластической потери устойчивости.

Ключевые слова: динамическая потеря устойчивости, закритическая деформация, цилиндрические оболочки, метод конечных элементов, изотропное упрочнение, эксперимент.

Введение

Анализ динамической потери устойчивости оболочек играет важную роль в решении широкого круга задач механики [1]. Об актуальности рассматриваемой проблемы свидетельствуют многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [2–13]. Подробный обзор научных работ по динамическому выпучиванию и закритической деформации оболочек представлен в [14]. С практической точки зрения проблема пластической потери устойчивости оболочек по-прежнему является актуальной для поиска оптимальных технических решений различных прикладных задач.

1. Постановка задачи

Рассматривается упругопластическая потеря устойчивости и закритическая деформация алюминиевой цилиндрической оболочки ($h_0 \times R \times H = 1,5 \times 18,5 \times 190$ мм) под действием осевой сжимающей динамической нагрузки (рис. 1). Характеристики материала оболочки: плотность $\rho = 2710$ кг/м³, модуль упругости $E = 71000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 210$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 250$ МПа, относительное удлинение $\delta = 13\%$. В расчетах используется билинейная диаграмма деформирования материала оболочки.

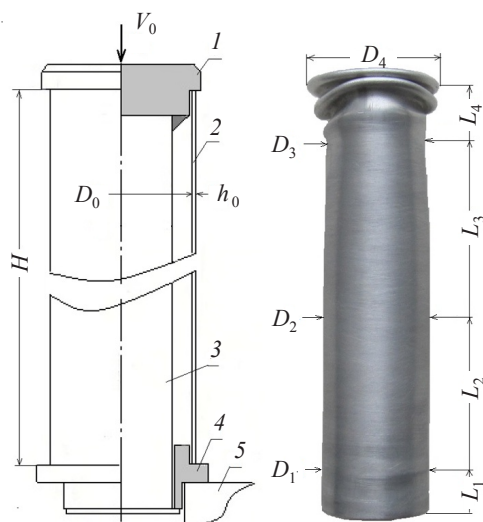


Рис. 1. Схема испытательной установки и контрольные размеры деформированного образца

Нагрузка формируется грузом массой $m = 86$ кг, падающим со скоростью $V_0 = 4,13$ м/с на верхнюю втулку 1, приваренную к стальному сердечнику 3 испытательного устройства, в котором установлена оболочка 2. Сердечник может свободно скользить относительно нижней втулки 4, жестко закрепленной на основании 5. Целью работы является расчетно-экспериментальное исследование особенностей процесса динамического деформирования оболочки при упругопластической потере устойчивости и критической деформации.

2. Основные соотношения и метод решения

Динамическое деформирование оболочки описывается в переменных Лагранжа. Уравнение движения выводится из вариационного принципа Журдена:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_{\Omega} \rho \ddot{U}_i \delta \dot{U}_i dV = \int_{\Gamma_p} P_i \delta \dot{U}_i d\gamma + \int_{\Gamma_q} P_i^q \delta \dot{U}_i d\gamma \quad (i, j = \overline{1, 3}), \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и σ_{ij} – компоненты тензоров скоростей деформаций и напряжений; U_i – перемещения в общей системе координат X ; ρ – плотность; P_i^q – контактное давление; P_i – распределенная нагрузка; Ω – область, занимаемая конструкцией; Γ_q – поверхность контакта; Γ_p – область действия внешнего давления; точка над символом означает частную производную по времени t . По повторяющимся индексам ведется суммирование. Скорости деформаций определяются в метрике текущего состояния:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{j,i}}{2} \quad (i, j = \overline{1, 3}), \quad (2)$$

$$\dot{U}_{i,j} = \frac{\partial \dot{U}_i}{\partial X_j}, \quad X_j = X_j|_{t=0} + \int_0^t \dot{U}_j dt.$$

Уравнения состояния устанавливаются отдельно для шаровых $\dot{\varepsilon}^v$, σ^v и девиаторных $\dot{\varepsilon}'_{ij}$, σ'_{ij} составляющих скоростей деформаций и напряжений. При упругопластическом деформировании девиаторные составляющие скорости деформации $\dot{\varepsilon}'_{ij}$ раскладываются на пластические $\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^p$ и упругие $\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^e$ компоненты. Девиаторные составляющие тензора напряжений вычисляются на основе соотношений теории течения с изотропным упрочнением:

$$\frac{D\sigma'_{ij}}{Dt} = 2G\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^e, \quad \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^p = \lambda S_{ij}, \quad (3)$$

$$S_{ij} S_{ij} \leq \frac{2}{3} \sigma_T^2, \quad \sigma_T = \sigma_T(\chi, I_{2\varepsilon}), \quad \chi = \sqrt{\frac{2}{3}} \int_0^t \sqrt{\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^p \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^p} dt.$$

Здесь D/Dt – производная по Яуманну, G – модуль сдвига, S_{ij} – компоненты тензора активных напряжений.

Численное решение задачи проводится методом конечных элементов по явной схеме интегрирования по времени в программном комплексе LS-DYNA [15]. Разработан ряд дискретных моделей размерностью от 2,5 до 340 тыс. твердотельных и оболочечных элементов. Численные эксперименты показывают, что лучшее согласие с экспериментами демонстрируют дискретные модели на основе четырехузло-

вых оболочечных элементов с билинейными функциями формы Belitschko, Lin, Tsay [16, 17] при характерном пространственном разрешении 1×1 мм.

3. Анализ результатов экспериментов и расчетов

Эксперименты показывают, что в результате ударного нагружения оболочка теряет устойчивость с образованием в области верхнего торца первой осесимметричной кольцевой складки, за которой следует вторая почти осесимметричная складка, а затем третья неосесимметричная локальная складка (рис. 2). С наружной стороны оболочки на гребнях складок заметно разрыхление материала, однако макротрещины отсутствуют. В результате деформации оболочки ее поперечное сечение обретает слегка овальную форму на большей части длины. Вблизи нижнего торца зарождается слабая кольцевая складка.



Рис. 2. Деформированный верхний торец оболочки

Формирование первой осесимметричной кольцевой складки обусловлено влиянием краевых условий на верхнем торце оболочки [14]. С образованием первой складки влияние торца ослабевает, вторичная потеря устойчивости оболочки переходит в энергетически менее затратную неосесимметричную форму. Расчеты показывают, что на формирование первой складки расходуется 51% кинетической энергии ударника, на образование второй – 28%, а на третью складку тратится 21%.

На рис. 3 показано сравнение расчетной кривой (голубая линия) и двух экспериментальных кривых (коричневые линии) перегрузок на падающей массе. Видно, что процесс нагружения длится около 20 мс. Пики нагрузки соответствуют моментам образования кольцевых складок. Расчетная кривая качественно и количественно близка к экспериментальным кривым.

В таблице 1 приводится сравнение характерных расчетных и экспериментальных размеров (см. рис. 1) деформированной оболочки на различных расстояниях: $L_1 = 5$ мм, $L_2 = 75$ мм, $L_3 = 136$ мм от основания. Близость расчетных и опытных размеров деформированной оболочки подтверждает достоверность численного моделирования.

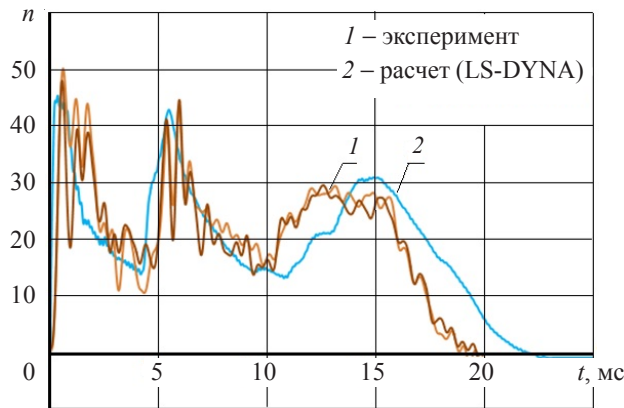


Рис. 3. Изменение осевой перегрузки ударника

Таблица 1

Характерные размеры	Опыт, мм	Расчет, мм	Δ , %
D_1	40,6	40,9	+0,7
D_{2min}	39,5	39,4	-0,3
D_{2max}	40,7	43,6	+7,1
D_{3min}	36,2	35,6	-1,7
D_{3max}	44,3	48,3	+9,0
D_4	50,0	52,7	+5,4
L_4	161,0	157,9	-1,9

Максимальные прогибы в первой складке более чем в 3 раза превышают толщину оболочки: $w_{1max}/h_0 = 3,4$, во второй и в третьей складках соответственно $w_{2max}/h_0 = 3,7$ и $w_{3max}/h_0 = 0,7$. Продольные сжимающие напряжения к моменту времени $t_1 \sim 400$ мкс достигают предела текучести при перегрузке $n_{max} = 44$ (см. рис. 3). Далее формируется первая кольцевая складка до момента времени $t_2 \sim 5$ мс, после чего начинается формирование второй и третьей складок.

На рис. 4 приведены зависимости изменения длины траекторий пластических деформаций (параметр Одквиста) в характерных точках двух взаимно перпендикулярных сечений $X = 0$ и $Z = 0$.

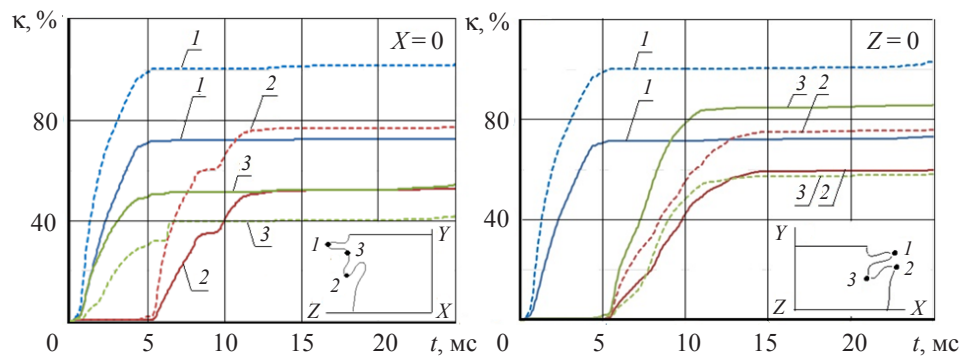


Рис. 4. Длина траектории пластических деформаций в характерных точках

Расчетная система координат изображена на рис. 2. Номера кривых совпадают с номерами точек на рис. 4, при этом сплошные линии соответствуют наружной поверхности, штриховые – внутренней. Из рисунка видно, что формирование первой осесимметричной складки приводит к весьма высоким уровням пластической деформации, которые внутри и снаружи гребня достигают максимальных значений: $\kappa_{\text{внут}} \sim 100\%$, $\kappa_{\text{нар}} \sim 70\%$. Вторая неосесимметричная складка формируется также примерно в течение 4,5 мс, ее максимальные пластические деформации на $\sim 25\%$ ниже. При формировании первой складки скорости деформации на внутренней поверхности достигают значений $\dot{\epsilon}_{\text{внут}} \sim 700 \text{ с}^{-1}$, на наружной $\dot{\epsilon}_{\text{нар}} \sim 200 \text{ с}^{-1}$, во второй складке $\dot{\epsilon}_{\text{внут}} \sim 400 \text{ с}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_{\text{нар}} \sim 100 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 5 показаны зависимости изменения параметра вида напряженного состояния Π [18] в характерных точках на внешней поверхности в сечении $X = 0$:

$$\Pi = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}$$

Из рис. 5 видно, что на внешней поверхности оболочки на гребне первой складки (точка 1) напряженное состояние близко к двухосному растяжению во время всего процесса деформирования. В точке 2 напряженное состояние в течение примерно 3 мс близко к одноосному сжатию ($\Pi \sim -0,6$), а затем, с формированием второй складки, переходит в двухосное растяжение ($\Pi \sim +0,8$). В точке 3 напряженное состояние имеет сложный колебательный характер, неоднократно изменяющийся от двухосного сжатия до одноосного растяжения. На внутренней поверхности напряженное состояние в точках 1 и 2 близко к одноосному и двухосному сжатию в течение всего процесса, а в точке 3 до момента времени $t \sim 10$ мс близко к двухосному растяжению, затем изменяется по сложному закону. Характер изменения параметра Π в сечении $Z = 0$ примерно такой же. Таким образом, в наиболее нагруженной точке на внешней поверхности гребня первой складки пластические деформации достигают максимального уровня $\kappa_{\text{нар}} \sim 70\%$ в условиях двухосного растяжения, а на внутренней поверхности $\kappa_{\text{внут}} \sim 100\%$ развиваются в условиях одно- и двухосного сжатия.

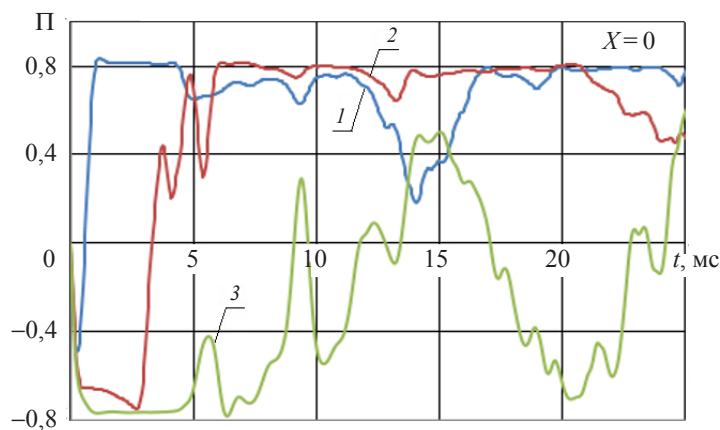


Рис. 5. Параметр Π в характерных точках внешней поверхности

Анализ эффектов сложного нагружения в девиаторном пространстве А.А. Ильюшина показывает, что при пластическом выпучивании пластин и оболочек траекто-

рии деформаций в характерных точках имеют большие углы излома как при осесимметричной [19, 20], так и при неосесимметричной [21, 22] формах потери устойчивости. Результаты трехмерного решения рассматриваемой задачи также свидетельствуют, что на поверхности складок в зонах двухосного растяжения углы излома траекторий превышают 90° при упругой разгрузке. В зонах двухосного сжатия траектории имеют малую и среднюю кривизну. При сложном характере нагружения в отдельных локальных зонах оболочки теория течения позволяет с приемлемой точностью описывать интегральные силовые и кинематические параметры процесса упругопластической потери устойчивости.

Заключение

Достоверность численного моделирования подтверждается близостью расчетных и экспериментальных данных как по изменению осевой динамической нагрузки, так и по характерным размерам деформированной оболочки.

Потеря устойчивости оболочки происходит при достижении предела текучести с образованием первой осесимметричной кольцевой складки, затем второй и третьей неосесимметричных складок с развитием радиальных прогибов до $w_{\max}/h_0 = 3,7$. При выпучивании оболочки скорости деформаций лежат в диапазоне $\dot{\epsilon} = 100\text{--}700 \text{ с}^{-1}$.

Максимальные пластические деформации на гребне первой складки (параметр Одквиста) возрастают до уровня $\kappa_{\text{нар}} \sim 70\%$ условиях двухосного растяжения, внутри в двухосном сжатии до $\kappa_{\text{внут}} \sim 100\%$, при этом в эксперименте наблюдается характерное разрыхление материала наружной поверхности первой складки, однако макротрещины отсутствуют.

Список литературы

1. Вольмир А.С. *Нелинейная динамика пластинок и оболочек*. М.: Наука, 1972. 432 с.
2. Борисенко В.И., Волошин В.Т. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрической оболочки при продольном ударе. *Прикладная механика*. 1967. Т. 3. №4. С. 45–52.
3. Vaughan H., Florence A.L. Plastic flow buckling of cylindrical shells due to impulsive loading. *Journal of Applied Mechanics*. 1970 Vol. 37. Iss. 1. P. 171–179.
4. Lyons W.G. Elastic and plastic buckling of cylindrical shells subjected to impulsive loads. *Archives of Mechanics*. 1970. Vol. 22. Iss. 1. P. 111–124.
5. Мяченков В.И. Исследование поведения симметрично нагруженных упругих оболочек вращения при динамическом нагружении с помощью метода прямых. *Труды VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин*. М.: Наука, 1973. С. 531–535.
6. Баженов В.Г., Игоничева Е.В. Динамическая потеря устойчивости и закритическое поведение тонкой цилиндрической оболочки с начальными несовершенствами под действием осевой ударной нагрузки. *Прикладные проблемы прочности и пластичности*. 1977. Вып. 6. С. 98–106.
7. Богданович А.Е., Фельдмане Э.Г. Анализ неосесимметричного выпучивания цилиндрических оболочек при осевом динамическом сжатии. *Известия АН СССР. МТТ*. 1982. №2. С. 144–154.
8. Бригадиров Г.В. Экспериментальное исследование упругопластического удара цилиндрической оболочки с присоединенной массой о жесткую преграду. *Прикладные проблемы прочности и пластичности*. 1982. Вып. 20. С. 101–104.
9. Абакумов А.И., Квасков Г.А., Новиков С.А., Сеницын В.А., Учаев А.А. Исследование упругопластического деформирования цилиндрических оболочек при осевом ударном нагружении. *Прикладная механика и техническая физика*. 1988. №3. С. 150–153.

10. Баженов В.Г., Бригадиров Г.В., Зефирова С.В., Ломунов В.К., Прокопенко М.Б. Численный анализ осесимметричного упругопластического выпучивания оболочек вращения с присоединенными жесткими и деформируемыми массами при ударе о преграду. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов*. 1990. С. 41–47.
11. Баженов В.Г., Игоничева Е.В. Нелинейный анализ неосесимметричного выпучивания цилиндрических и конических оболочек при осевом ударе. *Прикладная механика*. 1987. Т. 23. №5. С. 10–17.
12. Абросимов Н.А., Баженов В.Г., Елесин А.В. Моделирование нелинейного деформирования и потери устойчивости гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при импульсном нагружении. *Известия РАН. МТТ*. 2000. №1. С. 181–189.
13. Ala Tabiei, Gaurav Nilakantan. Reduction of acceleration induced injuries from mine blast under infantry vehicles. *Proceedings of 6th European LS-DYNA Users Conference*. 2007. Gothenburg, Sweden. P. 2.169–2.179.
14. Баженов В.Г., Баранова М.С., Кибец А.И., Ломунов В.К., Павленкова Е.В. Выпучивание упругопластических цилиндрических и конических оболочек при осевом ударном нагружении. *Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки*. 2010. Т. 152. №4. С. 86–105.
15. Hallquist J.O. *LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971 R7.1.2*. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2014. 1384 p.
16. Belitschko T., Tsay C.S. Explicit algorithms for nonlinear dynamics of shells. *ADM 48, ASME*. 1981. P. 209–231.
17. Belitschko T., Lin J., Tsay C.S. Explicit algorithms for nonlinear dynamics of shells. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1984. Vol. 42. Iss. 2. P. 225–251.
18. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. *Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. 226 с.
19. Баженов В.Г., Ломунов В.К. Экспериментально-теоретическое исследование упругопластического выпучивания цилиндрических оболочек при осевом ударе. *Прикладная механика*. 1983. Т. 19. №6. С. 23–29.
20. Баженов В.Г., Демарева А.В., Баранова М.С., Кибец А.И., Рябов А.А., Романов В.И. Конечное-элементное моделирование больших упругопластических деформаций сферической оболочки в скафандре под действием импульса перегрузки. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №3. С. 322–332.
21. Столяров Н.Н., Рябов А.А. Упругопластическое выпучивание прямоугольных пластин. В кн.: *Прикладная теория упругости*. Саратов: Изд-во СПИ, 1983. С. 27–36.
22. Кибец А.И., Лаптев П.В., Ломунов В.К., Жегалов Д.В. Численное моделирование больших формоизменений упругопластической цилиндрической оболочки при осевом сжатии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2001. Вып. 63. С. 132–137.

References

1. Volmir A.S. *Nelineynaya dinamika plastinok i obolochek [Nonlinear Dynamics of Plates and Shells]*. Moscow. Nauka Publ. 1972. 432 p. (In Russian).
2. Borisenko V.I., Voloshin B.T. An experimental study of the stability of a cylindrical shell under longitudinal impact. *International Applied Mechanics*. 1967. Vol. 3. No 4. P. 27–31.
3. Vaughan H., Florence A.L. Plastic flow buckling of cylindrical shells due to impulsive loading. *Journal of Applied Mechanics*. 1970 Vol. 37. Iss 1. P. 171–179.
4. Lyons W.G. Elastic and plastic buckling of cylindrical shells subjected to impulsive loads. *Archives of Mechanics*. 1970. Vol. 22. Iss. 1. P. 111–124.
5. Miachenkov V.I. Issledovanie povedeniya simmetrichno nagruzhennykh uprugikh obolochek vrascheniya pri dinamicheskom nagruzhении s pomoshchyu metoda pryamykh [Investigation of the behavior of symmetrically loaded elastic shells of revolution under dynamic loading using the direct method]. *Trudy VIII Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastin [Proceedings of the VIII All-Union Conference on the Theory of Shells and Plates]*. Moscow. Nauka Publ. 1973. P. 531–535 (In Russian).

6. Bazhenov V.G., Igonicheva E.V. Dinamicheskaya poterya ustoychivosti i zakriticheskoe povedenie tonkoy tsilindricheskoy obolochki s nachalnymi nesovershenstvami pod deystviem osevoy udarnoy nagruzki [Dynamic loss of stability and critical behavior of a thin cylindrical shell with initial imperfections under axial impact load]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti* [Applied Problems of Strength and Plasticity]. 1977. Iss. 6. P. 98–106 (In Russian).
7. Bogdanovich A.E., Feldmane E.G. Analiz neosesimmetrichnogo vypuchivaniya tsilindricheskikh obolochek pri osevom dinamicheskom szhatii [Analysis of non-axisymmetric buckling of cylindrical shells under axial dynamic compression]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids]. 1982. №2. P. 144–154 (In Russian).
8. Brigadirov G.V. Eksperimentalnoe issledovanie uprugoplasticheskogo udara tsilindricheskoy obolochki s prisoedinennoy massoy o zhestkuyu pregradu [Experimental investigation of elastic-plastic impact of a cylindrical shell with an attached mass on a rigid barrier]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti* [Applied Problems of Strength and Plasticity]. 1982. Iss. 20. P. 101–104 (In Russian).
9. Abakumov A.I., Kvaskov G.A., Novikov S.A., Sinitin V.A., Uchaev A.A. Study of elasto-plastic deformation for cylindrical shells with axial shock loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1988. No 3. P. 450–453.
10. Bazhenov V.G., Brigadirov G.V., Zefirov S.V., Lomunov V.K., Prokopenko M.B. Chislenny analiz osesimmetrichnogo uprugoplasticheskogo vypuchivaniya obolochek vrashcheniya s prisoedinennymi zhestkimi i deformiruemyimi massami pri udare o pregradu [Numerical analysis of axisymmetric elastoplastic buckling of shells of revolution with attached rigid and deformable masses on impact on the barrier]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Chislennoe modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh protsessov* [Applied Problems of Strength and Plasticity. Numerical Simulation of Physical and Mechanical Processes]. 1990. P. 41–47 (In Russian).
11. Bazhenov V.G., Igonicheva E.V. Nonlinear analysis of nonaxisymmetric buckling of cylindrical and conical shells in axial impact. *International Applied Mechanics*. 1987. Vol. 23. Iss. 5. P. 418–424.
12. Abrosimov N.A., Bazhenov V.G., Elesin A.V. Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i poteri ustoychivosti gladkikh i podkreplennykh tsilindricheskikh obolochek pri impul'snom nagruzenii [Modeling of nonlinear deformation and buckling of smooth and reinforced cylindrical shells under impulse loading]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids]. 2000. No 1. P. 181–189 (In Russian).
13. Ala Tabiei, Gaurav Nilakantan. Reduction of acceleration induced injuries from mine blast under infantry vehicles. *Proceedings of 6th European LS-DYNA Users Conference*. 2007. Gothenburg, Sweden. P. 2.169–2.179.
14. Bazhenov V.G., Baranova M.S., Kibets A.I., Lomunov V.K., Pavlenkova E.V. Vypuchivanie uprugoplasticheskikh tsilindricheskikh i konicheskikh obolochek pri osevom udarnom nagruzenii [Buckling of elastic-plastic cylindrical and conical shells of revolution under axial impact loading]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki* [Scientific Notes of Kazan University. Physical and Mathematical Sciences]. 2010. Vol. 152. No 4. P. 86–105 (In Russian).
15. Hallquist J.O. *LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971 R7.1.2*. Livermore. Livermore Software Technology Corporation. 2014. 1384 p.
16. Belitschko T., Tsay C.S. Explicit algorithms for nonlinear dynamics of shells. *ADM 48. ASME*. 1981. P. 209–231.
17. Belitschko T., Lin J., Tsay C.S. Explicit algorithms for nonlinear dynamics of shells. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1984. Vol. 42. Iss. 2. P. 225–251.
18. Kazakov D.A., Kapustin S.A., Korotkikh Yu.G. *Modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruktsiy* [Modeling of Deformation and Fracture Processes of Materials and Structures]. N. Novgorod. UNN Publ. 1999. 226 p. (In Russian).
19. Bazhenov V.G., Lomunov V.K. Treoreticheskoe issledovanie uprugoplasticheskogo udara tsilindricheskikh obolochek pri osevom dinamicheskom szhatii [Theoretical-experimental study of elastoplastic buckling of cylindrical shells under axial impact]. *International Applied Mechanics*. 1983. Vol. 19. No 6. P. 535–541.
20. Bazhenov V.G., Demareva A.V., Baranova M.S., Kibets A.I., Ryabov A.A., Romanov V.I. Konechno-elementnoe modelirovanie bolshikh uprugoplasticheskikh deformatsiy sfericheskoy obolochki v skafandre pod deystviem impul'sa peregruzki [Finite-element modeling of large

elastoplastic deformations of a spherical shell in a scaphander under an overload pulse]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 3. P. 322–332 (In Russian).

21. Stoliarov N.N., Ryabov A.A. Uprugoplasticheskoe vypuchivanie pryamougolnykh plastin [Elastoplastic buckling of rectangular plates]. In the book *Applied Theory of Elasticity*. Saratov. SPI Publ. 1983. P. 27–36 (In Russian).

22. Kibets A.I., Laptev P.V., Lomunov V.K., Zhegalov D.V. Chislennoe modelirovanie bolshikh formoizmeneniy uprugoplasticheskoy tsilindricheskoy obolochki pri osevom szhatii [Numerical solution of elastic-plastic nonsteady deformation of cylindrical shell under axial loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2001. Iss. 63. P. 132–137 (In Russian).

DYNAMIC BUCKLING AND POST BUCKLING DEFORMATION OF CYLINDRICAL SHELLS

Bazhenov V.G.¹, Ryabov A.A.², Ptitsyn S.O.²

¹*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Sarov Engineering Center, Nizhni Novgorod region, Diveevo district,
Satis, Russian Federation*

Elastoplastic dynamic buckling and post buckling deformation of an elongated cylindrical shell loaded in axial impact compression is studied numerically and experimentally. Deformation of the shell is computer-modeled using the finite-element method and the explicit time-integration scheme realized in complex LS-DYNA. The equations of state of the material of the shell are formulated in the framework of the isotropic hardening flow theory. To analyze the problem, a number of discrete models with the dimensions of 2,5 to 340 thousand solid and shell finite elements have been developed. The numerical experiments show that the best agreement with the experiments is achieved when using the discrete models with 1×1 mm 4-node shell elements with bilinear functions of the type of Belitschko, Lin, Tsay.

The characteristic features of the deformation process in the conditions of complex loading at its transition to the post buckling area are analyzed. The reliability of the numerical results is corroborated by their close agreement with the experimental data on the variation of the end impact load and characteristic dimensions of the deformed shell. It is noted that as a result of impact loading the shell loses its stability, forming two circular folds and a non-axisymmetric one in the vicinity of the upper end. Loosening of the material is observed on the outer side of the shell along the edges of the two former folds; however, no macro-cracks are formed. The calculations show that 51% of the kinetic energy of the striker is spent on forming the first fold, 28% on the second one, and 21% on the third one. The type of stressed-strained state in the region of the fold formation is studied. It is found that in Ilyushin's deviatoric space, when a shell buckles plastically, the deformation trajectories in characteristic points have abrupt jogs. Along the fold surfaces in the zones of biaxial tension, the trajectories jog at angles of over 90° under elastic unloading. In the zones of biaxial compression, the trajectories have low or moderate curvatures. It is demonstrated that, for complex loading, in separate local zones of the shell the flow theory makes it possible to describe reasonably accurately the integral force and kinematic parameters of the process of elastoplastic buckling.

Keywords: dynamic buckling, post buckling deformation, cylindrical shell, finite-element method, isotropic hardening, experiment.