

УДК 533.6:532.529

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ СЖАТИИ

© 2011 г.

А.А. Артемьева, А.И. Кибец, Ю.И. Кибец, Д.В. Шошин

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

aranan@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматриваются осесимметричные задачи потери устойчивости и закритического поведения упруго-пластической сферической оболочки при сжатии. Для описания движения оболочки применяется текущая лагранжева формулировка. В качестве уравнений состояния используются соотношения теории течения с изотропным упрочнением. Решение задачи основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест». Достоверность результатов расчетов подтверждается имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: метод конечных элементов, устойчивость, упругопластические деформации, сферическая оболочка.

Обзор работ [1–3], посвященных математическому моделированию потери устойчивости сферических куполов при сжатии, показал, что теоретические значения критических нагрузок могут в многократно превышать экспериментальные данные. Это связано как с особенностями применяемых математических моделей, так и с условиями проведения экспериментов. В первую очередь сюда относятся несовершенства формы оболочки. В настоящем исследовании приводятся результаты конечно-элементного решения геометрически и физически нелинейной задачи потери устойчивости и закритического поведения сферической оболочки при ее сжатии. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными позволяют оценить точность применяемой вычислительной модели.

Деформирование оболочки рассматривается в осесимметричной постановке и описывается в текущей лагранжевой формулировке с позиций механики сплошных сред. Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей. В качестве уравнений состояния используются соотношения теории течения с изотропным упрочнением. Решение определяющей системы уравнений основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест» [4, 5], реализованных в рамках вычислительной системы «Динамика-3» [6]. На ее основе решена осесиммет-

ричная задача упругопластического деформирования медной сферы ($R/h = 23.4$) при линейном увеличении сжимающего давления, равномерно распределенного по внешней поверхности. Для инициирования потери устойчивости оболочки на $1/10$ ее части задавался начальный прогиб, линейно распределенный по меридиану и не превышающий 0.01 толщины оболочки. Результаты решения приведены на рис. 1, 2.

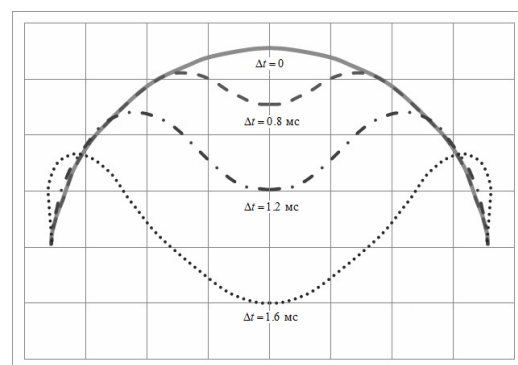


Рис. 1

На рис. 1 изображены формы верхней половины образующей оболочки для различных временных слоев, отсчитываемых от начала потери устойчивости $p(t_0) = p_{кр}^p$, $\Delta t = t - t_0$. Скорость нарастания внешнего давления выбиралась из условия квазистатического нагружения, исключая динамические эффекты.

На рис. 2 сравниваются остаточные конфигурации оболочки, полученные в расчете (пунктирная линия) и в эксперименте (сплошная линия).

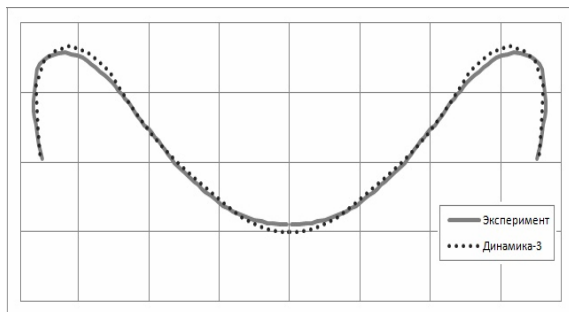


Рис. 2

Анализ результатов показывает, что до потери устойчивости деформирование сферической оболочки происходит в упругой области практически в однородном, безмоментном напряженном состоянии. К моменту потери устойчивости оболочки интенсивность напряжений достигает предела текучести, и ее дальнейшее деформирование происходит уже в упругопластической области. Изгиб оболочки после потери устойчивости сопровождается возрастанием скорости смещения ее полюса. Процесс упругопластического выпучивания оболочки до перехода в новую равновесную форму продолжается примерно 2 мс. При этом полюсная точка разгоняется до максимальной скорости $V \approx 97$ м/с. На сфере образуется локальная вмятина, радиус и глубина которой со временем увеличиваются. На начальном этапе узлы конечно-элементной сетки оболочки смещаются внутрь исходной сферы. Когда глубина вмятины в полюсе достигает приблизительно $3/4$ начального радиуса оболочки, ее сегмент за точкой перегиба выходит за пределы начальной конфигурации, что соответствует экспериментальным данным.

Рассмотрена задача упругопластического выпучивания стальной сферической оболочки при ее квазистатическом сжатии между двумя недеформируемыми плитами, смещающимися с постоянной скоростью. Проведено исследование предельной нагрузки и формы потери устойчивости оболочки в зависимости от отношения R/h . По результатам расчетов построена зависимость контактных сил от прогиба оболочки и определены оптимальные размеры образца для проведения экспериментального исследования выпучивания сферической оболочки на установке с заданными ограничениями по нагружающему усилию.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-4807.2010.8 и при поддержке РФФИ (проекты 11-08-00557-а, 11-08-00565-а).

Список литературы

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
2. Григолюк Э.И., Мамай В.И. Механика деформирования сферических оболочек. М.: Изд-во МГУ, 1983. 114 с.
3. Гудрамович В.С. Устойчивость упругопластических оболочек. Киев: Наук. думка, 1987. 216 с.
4. Баженов В.Г., Кибец А.И., Цветкова И.Н. Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. №2. С. 20–26.
5. Артемьева А.А. и др. Верификация конечно-элементного решения трехмерных нестационарных задач упругопластического деформирования, устойчивости и закритического поведения оболочек // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3, №2. С. 5–14.
6. Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.МЕ.20.Н00338.

NUMERICALLY STUDYING THE PROCESSES OF ELASTOPLASTIC DEFORMATION, LOSS OF STABILITY AND SUPERCRITICAL BEHAVIOR OF SPHERICAL SHELLS UNDER COMPRESSION

A.A. Artemyeva, A.I. Kibets, Yu.I. Kibets, D.V. Shoshin

An axisymmetric problem of loss-of-stability and supercritical behavior of elastoplastic spherical shell under compression is analyzed. A current Lagrangian formulation is used to describe the motion of the shell. Relations of the theory of flow with isotropic hardening are used as equations of state. The problem is analyzed using the finite element method and an explicit cross-type time-integration finite-difference scheme. The adequacy of the computed results is corroborated by available experimental data.

Keywords: finite element method, stability, elastoplastic deformations, spherical shell.