

# МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.3

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ НА МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

© 2011 г. *А.Н. Абросимов, Н.А. Абросимов, А.В. Елесин, Н.А. Новосельцева*

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

abrosimov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Построены математические модели и развиты численные методы решения прямых и обратных задач нестационарного нелинейного деформирования оболочек вращения нерегулярной структуры пакета по толщине. Для оснащения разработанных моделей необходимыми материальными параметрами предложен оригинальный метод, основанный на минимизации рассогласования функционалов расчетного и экспериментального моделирования динамического поведения пластин и оболочек вращения, изготовленных из исследуемых материалов. Разработаны алгоритмы и программные коды, реализующие сформулированные задачи, ориентированные на использование кластерных архитектур. Приведены примеры применения разработанного программного продукта.

*Ключевые слова:* компьютерные технологии, нелинейное деформирование, композитные оболочки вращения, многопроцессорные вычислительные системы.

### Введение

Весьма распространенными элементами конструкций современной техники являются многослойные оболочки нерегулярной структуры, состоящие из герметизирующих металлических и высокопрочных композитных слоев. Наличие композитных слоев в таких конструкциях позволяет за счет изменения количества армирующих волокон, направлений армирования и схемы чередования слоев создавать конструкции, обладающие существенными преимуществами (меньшей массой, повышенной трещиностойкостью, безосколочностью разрушения) по сравнению с цельнометаллическими. Ниже рассматривается комплексный подход к построению математических моделей и развитию компьютерных технологий решения прямых и обратных задач нелинейного деформирования многослойных композитных пластин и оболочек вращения при импульсных и ударных воздействиях.

### 1. Постановка задачи

Проводится построение разрешающей системы уравнений динамического деформирования

неоднородных пластин и оболочек, состоящих из нерегулярного набора изотропных и композитных слоев с резко отличающимися геометрическими и физико-механическими характеристиками. При этом композитный слой образован перекрестной намоткой однонаправленного композитного материала.

Кинематическая модель деформирования многослойного пакета базируется на гипотезе линейного изменения нормальных и касательных перемещений по толщине каждого слоя. При этом в качестве независимых искомым функций принимаются перемещения на поверхностях слоев. При построении геометрических зависимостей теории многослойных оболочек будем исходить из формул простейшего квадратичного варианта геометрически нелинейных соотношений [1]. Физические соотношения в изотропных металлических слоях устанавливаются на основе теории течения с линейным упрочнением, а в композитных – на основе закона Гука для ортотропного материала и соотношений линейной наследственной теории упругости в сочетании с теорией эффективных модулей [1]. Исходя из принципа возможных перемещений [2], выводятся уравнения движения многослойной оболочки и естествен-

ные граничные условия на контурных линиях, которые вместе с начальными условиями представляют полную систему уравнений, необходимую для исследования нелинейного динамического деформирования многослойных оболочек при импульсных воздействиях.

Задача параметрической идентификации материальных констант и функций моделей упруго-пластического и вязкоупругого поведения композитных и изотропных материалов ставится следующим образом. Требуется найти набор параметров (вектор) определяющих соотношений  $E = (\lambda, \mu, \sigma_*, g)^T$  или  $E = (E_{11}^0, E_{11}^\infty, E_{22}^0, E_{22}^\infty, E_{33}^0, E_{33}^\infty, G_{13}^0, G_{13}^\infty, G_{23}^0, G_{23}^\infty, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, \beta_1, \dots, \beta_N)^T$ , при которых математическая модель, описывающая динамическое поведение многослойных оболочек вращения, состоящих из изотропных упруго-пластических и композитных вязкоупругих слоев, наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными. Здесь под параметрами понимаются мгновенные и длительные модули упругости и сдвига  $E_{ij}^0, E_{ij}^\infty, G_{ij}^0, G_{ij}^\infty$ , параметры Ламе  $\lambda, \mu$ , пределы текучести  $\sigma_*$ , модули упрочнения  $g$ , коэффициенты Пуассона  $\nu_{ij}$  и времена релаксации  $\beta_n$ . В результате задача сводится к нахождению вектора коэффициентов физических уравнений, обеспечивающего в выбранной норме минимальное расстояние между расчетными и экспериментальными данными. В качестве нормы выбирается функционал, представляющий сумму среднеквадратичных отклонений характерных значений расчетных и экспериментальных перемещений и деформаций и их скоростей:

$$F(E) = \sum_{m=1}^M \int_S \left\{ \sum_{i=1,3} [A_i (u_i^m - u_i^{*m})^2 + B_i (\dot{u}_i^m - \dot{u}_i^{*m})^2] + \sum_{i=1,2} [C_i (e_i^m - e_i^{*m})^2 + D_i (\dot{e}_i^m - \dot{e}_i^{*m})^2] \right\} dS,$$

где  $S$  – область, занимаемая оболочкой;  $A_i, B_i, C_i, D_i$  – весовые коэффициенты;  $u_i^m, \dot{u}_i^m, e_i^m, \dot{e}_i^m, u_i^{*m}, \dot{u}_i^{*m}, e_i^{*m}, \dot{e}_i^{*m}$  – характерные значения расчетных и экспериментальных перемещений, деформаций и их скоростей, выделенные на временных осциллограммах.

## 2. Метод и результаты решения задачи

Численная реализация сформулированных задач разбивается на три самостоятельных этапа: решение начально-краевой задачи нелинейного деформирования многослойных пластин и оболочек вращения при импульсных и ударных воз-

действиях, анализ чувствительности целевых функционалов по искомым параметрам (проектным переменным) и поиск глобального минимума целевых функций.

Первый этап решения задачи идентификации основывается на явной вариационно-разностной схеме [2]. На втором этапе решения задач идентификации и оптимального проектирования осуществляется анализ чувствительности целевых функционалов по переменным проектирования. Это исследование базируется на теории глобальных показателей чувствительности для изучения нелинейных математических моделей [3]. На третьем этапе решается задача поиска глобального минимума целевых функций на основе генетического алгоритма, который заключается в последовательном подборе, комбинировании и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию [4]. Осуществлена программная реализация разработанных вычислительных алгоритмов, ориентированная на использование многопроцессорных вычислительных систем и кластерных архитектур. Параллелизм вычислительного процесса осуществляется через распределение независимых вычислений как посредством разбиения расчетной области на ряд подобластей (геометрическое распараллеливание), так и в результате вычислений показателей чувствительности и целевых функций для каждого случайного набора искоемых параметров. Параллельная версия программного кода позволяет сократить время счета более чем на два порядка по сравнению с последовательной. Приведены примеры применения разработанного программного продукта, свидетельствующие о его достоверности и возможности эффективного решения достаточно широкого круга задач динамического деформирования, идентификации деформационных характеристик и оптимального проектирования неоднородных композитных пластин и оболочек вращения.

## Заключение

Построенная разрешающая система уравнений позволяет с необходимой точностью анализировать нестационарные процессы деформации в многослойных композитных оболочках вращения. Предлагаемый метод идентификации параметров определяющих соотношений вязкоупругого деформирования композитных и изотропных упруго-пластических материалов открывает возможность адекватного описания динамического поведения элементов конструкций, изготовленных из исследуемых материалов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке по программе ведущих научных школ (код проекта НШ - 4807.2010.8) и в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

*Список литературы*

1. Абросимов Н.А., Баженов В.Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций. Н. Новгород:

Изд-во ННГУ, 2002. 400 с.

2. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987. 542 с.

3. Соболев И.М. Глобальные показатели чувствительности для изучения нелинейных математических моделей // Математическое моделирование. 2005. Т. 17, №9. С. 43–52.

4. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, M.A.: Addison-Westley Publ. Comp., 1989. 154 p.

**SOLUTION OF DIRECT AND INVERSE PROBLEMS COMPUTER TECHNOLOGY FOR NONLINEAR DYNAMIC DEFORMATION LUMPY OF COMPOSITE SHELLS OF REVOLUTION USING MULTIPROCESSOR SYSTEMS**

*A.N. Abrosimov, N.A. Abrosimov, A.V. Elesin, N.A. Novosel'ceva*

The mathematical models and numerical methods for solving direct and inverse problems of nonstationary nonlinear deformation of shells of revolution of irregular structure package through the thickness are developed. The original method based on the minimization functional mismatch of calculated and experimental modeling of the dynamic action of plates and shells of revolution made of the test materials for filling developed models with the necessary material parameters is suggested. The algorithms and software codes that implement the formulated objectives focused on the use of cluster architectures are developed. Examples illustrating the application of the developed software product are given.

*Keywords:* computer technology, nonlinear deformation, composite shells of revolution, multiprocessor computer systems.