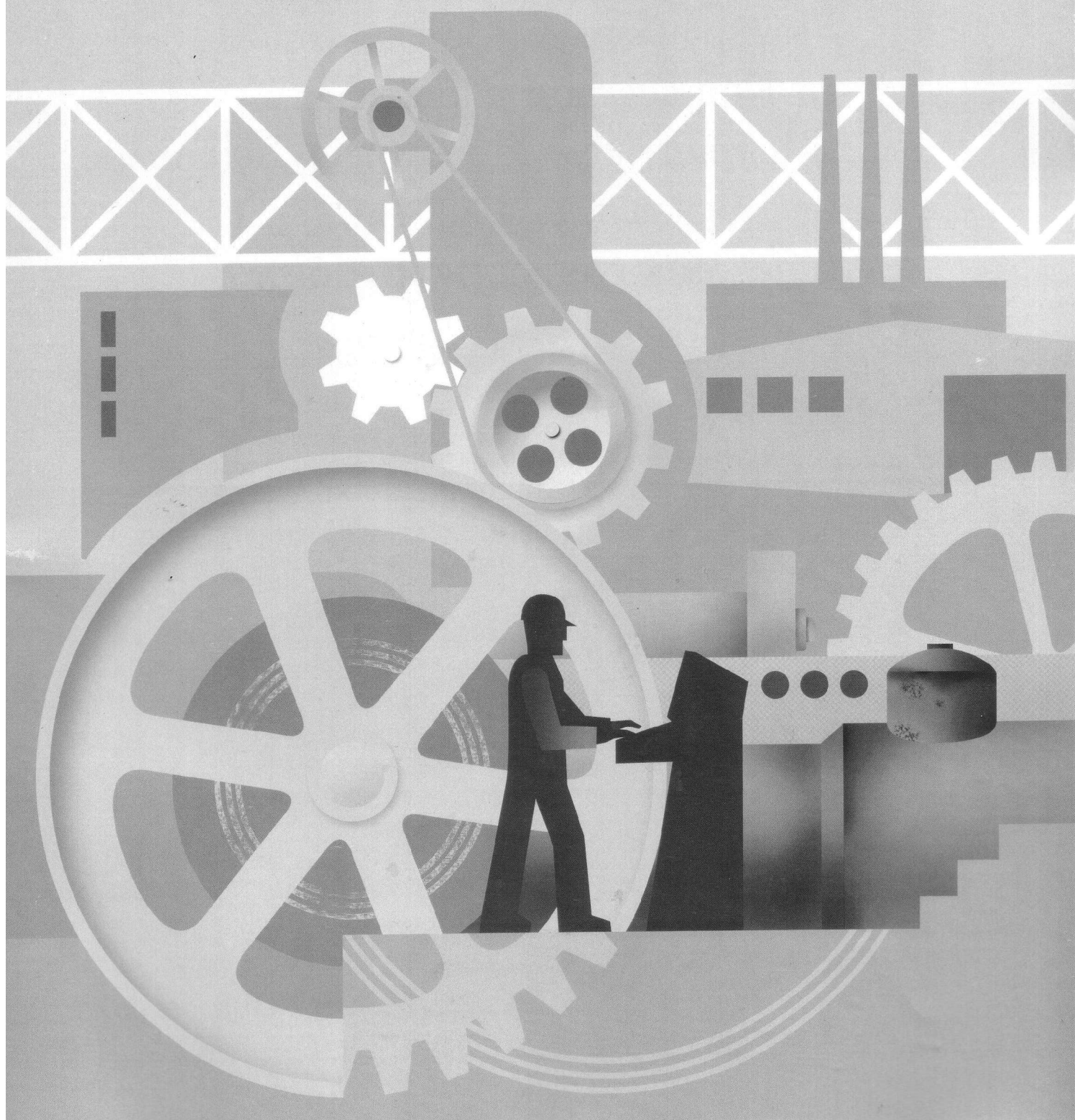


ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ISSN 0536-1044

№12/2011



Содержание

Расчет и конструирование машин

<i>В.А. Калядин, М.М. Стебулянин.</i> Модель мехатронного модуля с двумя степенями подвижности.	3
<i>К.В. Сызранцева, Л.А. Черная.</i> Оценка долговечности подшипников качения при случайном режиме их нагружения.	8
<i>С.С. Гаврюшин.</i> Анализ и синтез тонкостенных элементов робототехнических устройств с предписанным законом деформирования.	12
<i>Л.И. Верейна.</i> Исследование динамики узла многоцелевого станка при быстром торможении.	20
<i>Чан Ки Ан.</i> Равновесная конфигурация сетчатой оболочки с несимметричной укладкой нитей по геодезическим линиям.	23

Транспортное и энергетическое машиностроение

<i>Л.В. Грехов.</i> Проектирование топливных насосов высокого давления для аккумуляторных систем дизелей.	27
<i>А.Г. Кузнецов.</i> Описание зависимостей между параметрами рабочего процесса динамической модели комбинированного дизеля.	33

Технология и технологические машины

<i>С.Г. Васильев, В.В. Попцов.</i> Повышение твердости поверхности детали термическим воздействием с использованием деформирующего резания.	37
<i>А.Е. Древаль, О.В. Мальков, А.В. Литвиненко.</i> Точность обработки внутренних резьб комбинированным инструментом.	44
<i>Е.В. Беляков, В.А. Тарасов.</i> Динамика уплотнения композиционного материала при горячем прессовании.	53
<i>Д.В. Мальков, И.М. Головки.</i> Статические испытания на растяжение наружных резьб, изготовленных резьбофрезерованием.	58
<i>Р.Ш. Загидуллин, В.М. Скиба.</i> Анализ методов и разработка технических средств для экспериментальных исследований динамических сигналов металлорежущих станков.	65
<i>В.В. Додонов.</i> Использование элементов теории массового обслуживания для анализа производительности и надежности автоматизированных станочных систем.	70
<i>Л.В. Виноградов.</i> Определение обрабатываемости материалов по себестоимости и производительность обработки.	77

Contents

Calculation and design of machinery

<i>V.A. Kalyadin, M.M. Stebulyanin.</i> Model of a mechatronic module with two degrees of freedom.	3
<i>K.V. Syzranisev, L.A. Chernaya.</i> Estimation of bearings durability under random loading mode.	8
<i>S.S. Gavryushin.</i> Analysis and synthesis of robotic devices thin-walled structures with the prescribed Law of deformation.	12
<i>L.I. Vereina.</i> Investigation of the combined machine component dynamics during rapid deceleration.	20
<i>Chan Khi Ahn.</i> Equilibrium profile of a lattice shell with asymmetrical winding along geodesic lines.	23

Transportation and power engineering

<i>L.V. Grehov.</i> Designing high pressure fuel pumps for diesel accumulator systems.	27
<i>A.G. Kuznetsov.</i> Description of dependence between operational parameters for a dynamic diesel model.	33

Technology and process machines

<i>S.G. Vasiliev, V.V. Poptsov.</i> Increasing a workpiece surface hardness by thermal effect using macro-deformation process.	37
<i>A.E. Dreval, O.V. Malkov, A.V. Litvinenko.</i> Accuracy of machining internal threads with a combined tool.	44
<i>E.V. Belyakov, V.A. Tarasov.</i> Dynamic compaction of composite materials under hot pressing.	53
<i>D.V. Malkov, I.M. Golovko.</i> Static tension tests of external threads made by thread milling.	58
<i>R.Sh. Zagidullin, V.M. Skiba.</i> Analysis of methods and development of hardware for experimental investigation of dynamic signals of metal-cutting machine tools.	65
<i>V.V. Dodonov.</i> Application of the queueing theory elements to analyze productivity and reliability of automated machine tool systems.	70
<i>L.V. Vinogradov.</i> Determining materials workability in terms of cost price and processing productivity.	77

УДК 539.3

Равновесная конфигурация сетчатой оболочки с несимметричной укладкой нитей по геодезическим линиям

Чан Ки Ан

Разработана методика расчета и построения равновесных профилей сетчатых оболочек, полученных геодезической намоткой с различными углами укладки нитей левого и правого семейств. Методика сведена к численному интегрированию системы двух уравнений с начальными условиями. Приведены примеры построения равновесных профилей сетчатых оболочек с несимметрично уложенными нитями при различных значениях безразмерных параметров.

Ключевые слова: сетчатые оболочки, равновесная конфигурация, геодезическая несимметричная укладка нитей.

The article presents an approach to calculate the uniform deformation of lattice shells obtained from geodesic winding two systems of left and right wires around a spiral rib at different angles. The approach is based on solving a system of two differential equations with specific initial conditions using numerical method. As illustrative examples, we apply the approach to calculate the uniform deformation of lattice shells asymmetrically wound with different values of dimensionless parameters.

Keywords: lattice shells, equilibrium profile, asymmetrical geodesic winding.

Композитные оболочки, выполненные непрерывной намоткой успешно применяют при конструировании баллонов давления, корпусов летательных аппаратов и других изделий. Если семейств нитей всего две — левое и правое, то сетка нитей является геометрически изменяемой, так как в ее основе лежит нежесткая фигура — параллелограмм, а сами нити могут свободно изгибаться. Некоторую конфигурацию, которая называется равновесной, такая оболочка приобретает при приложении основных нагрузок — давления и осевой силы (аналогичным образом ведут себя «мягкие» оболочки). Равновесная конфигурация определяется теорией сетчатых оболочек [1, 2]. При намотке на оправку из условия отсутствия проскальзывания следует, что нить должна ложиться по геодезическим линиям оправки [3], поэтому равновесные профили таких оболочек иногда называют геодезическими.

Как правило, наклон нитей левого и правого семейств одинаков [1—3], что обусловлено технологией непрерывной намотки. Однако, если допустить возможность различного наклона нитей левого и правого семейств, то это существенно расширит спектр равновесных конфигураций сетчатых оболочек, изготавливаемых намоткой. Данная ста-



Чан Ки Ан
аспирант кафедры
«Прикладная механика»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Соотношение (3) обобщает хорошо известное уравнение (4) из работ [1, 2] на случай несимметричной укладки нитей

$$T_2 = T_1 \operatorname{tg}^2 \beta. \quad (4)$$

В работе [1] показано, что из формулы (4) следует результирующее геометрическое соотношение

$$\sin \theta = A(r^2 + P_0 / \pi p) e^{-\int \frac{\operatorname{tg}^2 \beta}{r} dr}, \quad (5)$$

где θ — угол наклона нормали к оси оболочки; A — произвольная постоянная.

Поскольку переход от симметричной укладки к несимметричной фактически сводится к замене (4) на (3), т. е. к замене $\operatorname{tg}^2 \beta$ на $\operatorname{tg} \beta_n \operatorname{tg} \beta_l$, то очевидно, что аналогичная замена в (5) приводит к результирующему геометрическому соотношению для несимметричной укладки нитей

$$\sin \theta = A(r^2 + P_0 / \pi p) e^{-\int \frac{\operatorname{tg} \beta_n \operatorname{tg} \beta_l}{r} dr}. \quad (6)$$

Для оболочек, изготавливаемых намоткой натянутых нитей на оправку (например, для стеклопластиковых оболочек, получаемых спиральной намоткой), нити укладывают по кратчайшим расстояниям, т. е. по геодезическим линиям. Уравнение геодезических линий на поверхности вращения имеет вид [1]

$$\sin \beta_n = \frac{c_n}{r}; \quad \sin \beta_l = \frac{c_l}{r}, \quad (7)$$

где c_n, c_l — геометрические параметры, определяемые технологией изготовления. Подстановка (7) в (6) приводит к неопределенному интегралу, вычисляемому в аналитическом виде:

$$\begin{aligned} \int \frac{\operatorname{tg} \beta_n \operatorname{tg} \beta_l}{r} dr &= \int \frac{c_n c_l}{r \sqrt{r^2 - c_n^2} \sqrt{r^2 - c_l^2}} dr = \\ &= \frac{1}{2} \ln \left| \frac{c_l \sqrt{r^2 - c_n^2} + c_n \sqrt{r^2 - c_l^2}}{c_n \sqrt{r^2 - c_n^2} - c_l \sqrt{r^2 - c_l^2}} \right|, \end{aligned} \quad (8)$$

где знак модуля вызван симметрией при замене индексов ($c_n \leftrightarrow c_l$).

Из выражений (6) и (8) следует основная формула, определяющая геометрию рассматриваемого класса оболочек:

$$\sin \theta = A \left(r^2 + \frac{P_0}{\pi p} \right) \left| \frac{c_l \sqrt{r^2 - c_n^2} - c_n \sqrt{r^2 - c_l^2}}{c_n \sqrt{r^2 - c_n^2} + c_l \sqrt{r^2 - c_l^2}} \right|^{1/2}. \quad (9)$$

Постоянная A определяется из условия на экваторе оболочки: для максимального радиуса оболочки $r = R$ наклон нормали к оси составляет прямой угол ($\sin \theta = 1$), это приводит к окончательному выражению для $\sin \theta$:

$$\sin \theta = \frac{\left(r^2 + \frac{P_0}{\pi p} \right) \left| \frac{c_l \sqrt{r^2 - c_n^2} - c_n \sqrt{r^2 - c_l^2}}{c_n \sqrt{r^2 - c_n^2} + c_l \sqrt{r^2 - c_l^2}} \right|^{1/2}}{\left(R^2 + \frac{P_0}{\pi p} \right) \left| \frac{c_l \sqrt{R^2 - c_n^2} - c_n \sqrt{R^2 - c_l^2}}{c_n \sqrt{R^2 - c_n^2} + c_l \sqrt{R^2 - c_l^2}} \right|^{1/2}}. \quad (10)$$

Осевая и радиальная координата связаны следующим образом:

$$dz = dr \operatorname{tg} \theta = - \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} dr. \quad (11)$$

Из выражений (10) и (11) следует, что определение уравнения меридиана оболочки $z = z(r)$ свелось к квадратуре. Однако вычисление указанной квадратуры затруднительно из-за обращения знаменателя (11) в нуль на экваторе оболочки. В связи с этим численное интегрирование проводилось по безразмерному меридиану оболочки на основе соотношений

$$\begin{aligned} \frac{dz}{ds} &= \sin \theta; \\ \frac{dr}{ds} &= \cos \theta = -\sqrt{1 - \sin^2 \theta}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для сокращения числа параметров, определяющих форму оболочки, были введены безразмерные параметры

$$\alpha_n = \frac{c_n}{R}; \quad \alpha_l = \frac{c_l}{R}; \quad \Pi = \frac{P_0}{p \pi R^2}. \quad (13)$$

Аналогичным образом вводились безразмерные переменные:

$$\sigma = \frac{s}{R}; \quad \rho = \frac{r}{R}; \quad \zeta = \frac{z}{R}. \quad (14)$$

Подстановки (13), (14) в (10), (12) приводят к системе безразмерных дифференциальных уравнений, удобной для расчета профиля оболочки:

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \theta &= \frac{\rho^2 + \Pi}{1 + \Pi} \frac{\frac{\alpha_l \sqrt{\rho^2 - \alpha_n^2} - \alpha_n \sqrt{\rho^2 - \alpha_l^2}}{\alpha_n \sqrt{\rho^2 - \alpha_l^2} + \alpha_l \sqrt{\rho^2 - \alpha_n^2}}}{\frac{\alpha_l \sqrt{1 - \alpha_n^2} - \alpha_n \sqrt{1 - \alpha_l^2}}{\alpha_n \sqrt{1 - \alpha_l^2} + \alpha_l \sqrt{1 - \alpha_n^2}}}^{1/2}; \\ \frac{d\zeta}{d\sigma} &= \sin \theta; \\ \frac{d\rho}{d\sigma} &= -\sqrt{1 - \sin^2 \theta}. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Для интегрирования уравнения (15) применялись встроенные процедуры из компьютерного пакета MATLAB. Нижняя граница интервала интегрирования принималась равной нулю ($\sigma = 0$), верхняя граница определялась подбором. Система (15) интегрировалась со следующими начальными условиями:

$$\left\{ \begin{aligned} \zeta(0) &= 0; \\ \rho(0) &= 1. \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Построенные профили оболочек, полученные численным интегрированием уравнения (15) с учетом (16) представлены на рис. 3–4.

С целью сопоставления на рисунках показаны также равновесные профили сетчатых оболочек с симметрично уложенными нитями ($\alpha_l = \alpha_n = 0,5$), для расчета которых применялась методика из [1] (применение уравнений (16) в случае симметричной укладки нитей невозможно из-за обращения числителя и знаменателя дроби в нуль). Из рисунков видно, что несимметричная укладка, в самом деле, позволяет получать профили существенно отличающиеся от традиционных профилей, изготовленных симметричной намоткой.

Выводы

1. Разработана методика расчета и построения равновесных профилей сетчатых оболочек с несимметричной геодезической укладкой нитей.
2. Основное уравнение, определяющее равновесную конфигурацию оболочки, проинтегрировано в аналитическом виде. Для уравнений, определяющих координаты равновесного профиля приведены несложные дифференциальные уравнения (16) с начальными условиями (17).

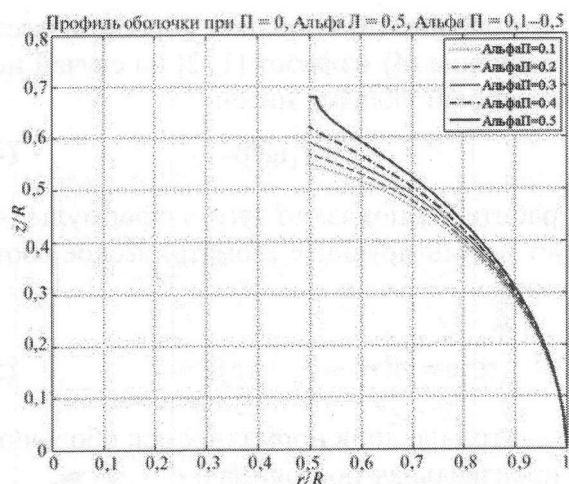


Рис. 3. Равновесные профили сетчатой оболочки при $\Pi=0$, $\alpha_l=0,5$, $\alpha_n=\{0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5\}$

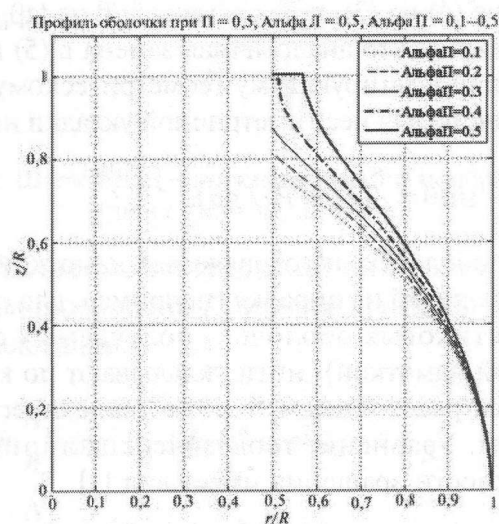


Рис. 4. Равновесные профили сетчатой оболочки при $\Pi=0,5$, $\alpha_l=0,5$, $\alpha_n=\{0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5\}$

3. Представлены примеры построения равновесных профилей сетчатых оболочек с несимметрично уложенными нитями при различных значениях безразмерных параметров. Показано, что несимметричная укладка нитей значительно расширяет набор равновесных профилей.

Литература

1. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
2. Бидерман В.Л., Бухин Б.Л. Уравнения равновесия безмоментной сетчатой оболочки // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1966. № 1. С. 81–89.
3. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.

Статья поступила в редакцию 01.11.2011