

Параметрическая оптимизация анизотридных оболочек нерегулярной структуры

© Т.В. Бурнышева, О.А. Штейнбрехер

Новокузнецкий институт (филиал) ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Новокузнецк, 654041, Россия

Рассмотрен подход к решению задачи параметрической оптимизации сетчатых анизотридных оболочек с нерегулярной структурой. Сетчатые конструкции широко применяются в строительстве и машиностроении. В данной работе рассматривается оптимальное проектирование таких конструкций, применяемых в аэрокосмической отрасли, которое позволяет повысить эффективность их использования, минимизировав массу, при соблюдении условий на прочность и устойчивость. Приведена постановка задачи оптимального проектирования сетчатых конструкций в общем виде. Алгоритм оптимизации основан на методе симплексного поиска. Для описания невыпуклых гладких участков границ использован частичный R-предикат допустимой области. Приведены результаты решения задачи оптимизации для конкретной конструкции с нарушением регулярности реберной структуры. Полученные результаты показывают, что рассматриваемый алгоритм может применяться для оптимального проектирования как регулярных, так и нерегулярных сетчатых структур.

Ключевые слова: оптимальное проектирование конструкций, сетчатая конструкция, минимум массы, прочность, устойчивость, алгоритм оптимизации

Введение. Сетчатые конструкции широко применяются в машиностроении [1, 2] и строительстве. В настоящее время при проектировании зданий и других строительных сооружений активно используются сетчатые оболочки, конструкции произвольной формы [3].

Применение сетчатых конструкций широко распространено в авиа- [4] и ракетостроении [1]. Анизотридные конструкции используются либо как самостоятельные конструктивные элементы, соединяющие различные агрегаты (например, выводимый аппарат с носителем), либо совместно с обшивкой, обеспечивая сплошную поверхность для герметизации или ограждения агрегатов от воздействия потока воздуха [1, 5, 6]. Сетчатые анизотридные композиционные оболочки относятся к силовым конструкциям, набор структурных элементов которых должен обеспечивать их прочность и жесткость под действующими нагрузками. При этом применение сетчатых структур позволяет снизить массу конструкции при тех же нагрузках. За счет этого повышается масса полезного груза и, следовательно, повышается экономическая эффективность изделия в целом.

Основной вклад в разработку сетчатых анизотридных конструкций из композиционных материалов внесла школа В.В. Васильева.

Известны аналитические оценки напряжений регулярной реберной структуры сетчатой оболочки, полученные В.В. Васильевым и В.А. Бунаковым при использовании вариационного принципа и безмоментной теории с учетом замены реберной структуры условно сплошным слоем с осредненной жесткостью. Дискретный подход к моделированию сетчатых анизотридных конструкций для оценки напряженно-деформированного состояния использовали В.В. Васильев, А.Ф. Разин, А.А. Бабичев, В.П. Булдаков, М.В. Никитин и другие. Исследования сетчатого адаптера (без обшивки) на устойчивость с использованием дискретного моделирования проводили Е.В. Морозов, А.В. Лопатин, В.А. Нестеров.

А.Ф. Разиным получены аналитические оценки на проектные параметры сетчатых оболочек из композиционных материалов регулярной структуры без обшивки. Решались задачи оптимального проектирования сетчатых цилиндрических и конических оболочек при условии минимума массы конструкции. В качестве ограничений выступали условия по прочности, общей, местной и осесимметричной формам потери устойчивости, а также ограничения, специфические для композитных сетчатых конструкций, изготавливаемых методом непрерывной намотки.

Е.В. Морозовым, А.В. Лопатиным и В.А. Нестеровым были получены зависимости массы сетчатой цилиндрической реберной структуры от длины отсека и угла наклона спирального ребра к образующей. Сетчатая оболочка имела регулярную реберную структуру, моделирование которой проводилось дискретно.

В.П. Полиновский использовал численный метод при выборе оптимальных параметров композитного сетчатого отсека агрегата космического летательного аппарата по критерию минимума массы. Методика выбора оптимальных параметров анизотридных конструкций включает в себя построение дискретных моделей с различными значениями углов наклона спиральных ребер, подбор высоты кольцевых и спиральных ребер и ширины спирального ребра при критерии минимума массы с учетом ограничений по прочности и устойчивости. Данный метод не гарантирует отыскание оптимума, поскольку не учитывает взаимного влияния размеров сечения и углов наклона спирального ребра.

Таким образом, в настоящее время достаточно разработаны аналитические методы решения задачи оптимального проектирования анизотридных конструкций регулярной структуры без обшивки при критерии минимума массы.

Определение оптимальных параметров анизотридной конструкции с обшивкой и нарушением регулярности реберной структуры

рассматривалось для конкретных изделий с заданными условиями нагружения. Известные методы и алгоритмы решения задачи минимизации не позволяют в полной мере учесть особенности таких задач: большое количество ограничений, которые должны выполняться при эксплуатации такой конструкции, при этом в качестве критерия оптимальности используется либо минимум массы конструкции, либо минимум стоимости конструкции.

Следовательно, требуются методы и алгоритмы для оптимального проектирования сетчатых оболочек нерегулярной структуры. Целью работы является разработка и апробация методики оптимизационного расчета для многоэлементных конструкций по критерию минимума массы.

Композитные анизотридные конструкции. Основной классификационной особенностью композитных сетчатых оболочек является наличие нескольких семейств пересекающихся ребер, образующих регулярную структуру, траектории армирования являются скрещивающимися (а не пересекающимися) в пространстве линиями. Структура модели анизотридной сетчатой оболочки как системы взаимодействующих конструктивных элементов представлена на рис. 1.

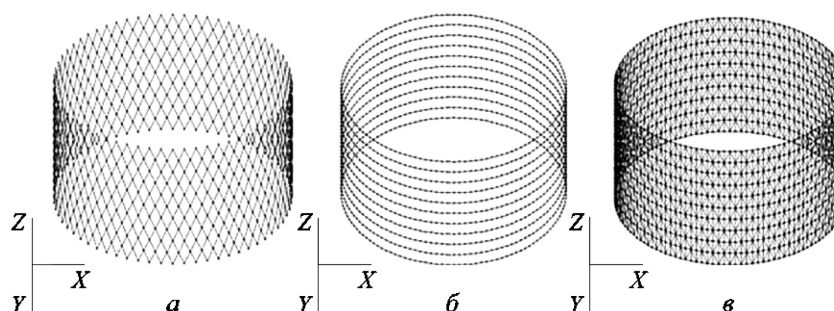


Рис. 1. Структура модели анизотридной сетчатой оболочки:
a — спиральные ребра; *б* — кольцевые ребра; *в* — обшивка

Различают анизотридные композиционные оболочки регулярной и нерегулярной структуры (рис. 2). Наличие вырезов и подкрепляющих элементов приводит к существенному различию топологии конструктивно-силовых схем анизотридных конструкций в различных изделиях, что существенно затрудняет решение задач по обеспечению прочности реальных космических летательных аппаратов.

По верхней и нижней кромке анизотридная оболочка, как правило, подкреплена торцевыми шпангоутами, которые используют для соединения данной конструкции с другими отсеками агрегата летательного аппарата.

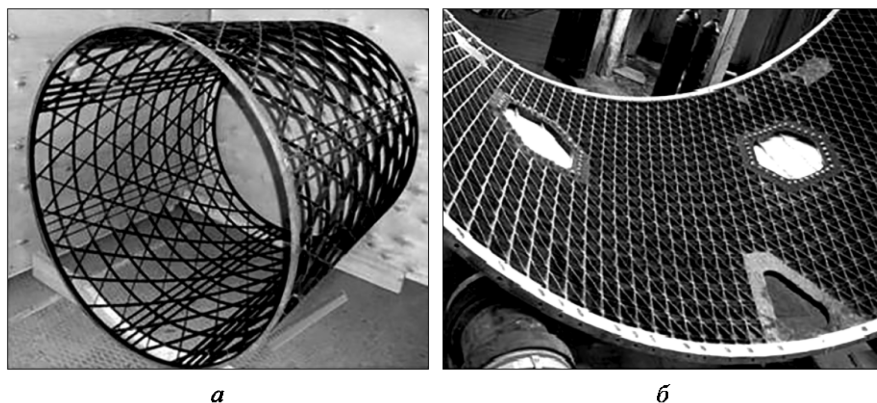


Рис. 2. Сетчатые оболочечные конструкции, выполненные из композиционных материалов: регулярные (а) и с нарушением регулярности (б)

В силу регулярной структуры, лежащей в основе сетчатых оболочек, ее геометрию и топологию можно задать параметрически. Неизменными являются габаритные параметры конструкции — внешний и внутренний радиусы R_0 и R_z , высота оболочки L , Q — приложенная нагрузка. Типовая сетчатая конструкция характеризуется следующими проектными (структурными, варьируемыми) параметрами: толщиной сетчатой структуры H , толщиной спиральных и кольцевых ребер b_h и b_c , расстояниями между спиральными ребрами a_h (по нормали к оси ребра) и между кольцевыми ребрами a_c , углом наклона спиральных ребер φ (по отношению к образующей) (рис. 3). Кроме этого, проектными параметрами могут служить также наличие и отсутствие конструктивных элементов (вырезов, усилений и т. п.), места их расположения и геометрические размеры.

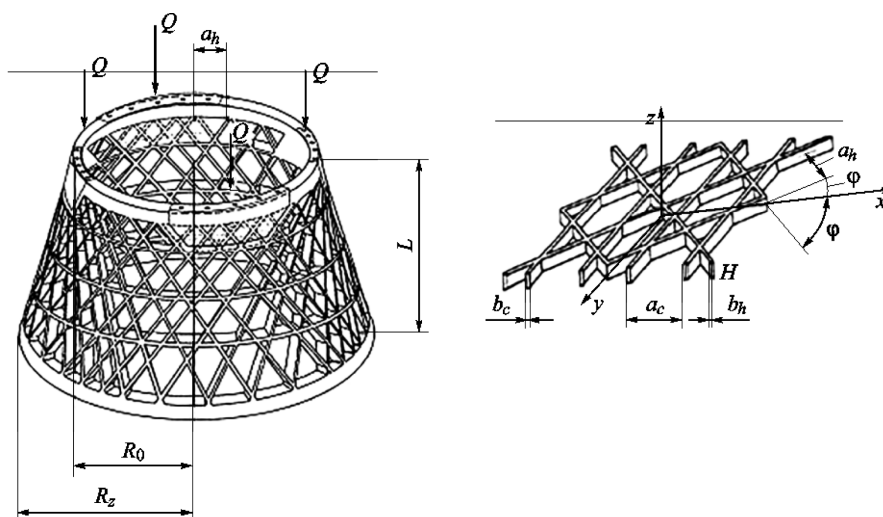


Рис. 3. Сетчатая структура

Постановка задачи и алгоритм оптимального проектирования. Рассмотрим постановку задачи оптимального проектирования таких конструкций. В силу особенностей производства в физико-механических параметрах однотипных конструкций может наблюдаться существенный разброс. Поэтому математическая модель может быть рассмотрена в виде «черного ящика», в которой внутреннее строение моделируемого объекта не раскрывается и фиксируются причины реакции объекта на приложенные воздействия [7]:

$$q = K(p)r, \quad (1)$$

где q — вектор переменных состояния (перемещений, напряжений и деформаций); r — вектор переменных воздействий (приложенные силы); K — оператор модели, который отображает элементы пространства воздействий на элементы пространства состояний; p — вектор параметров модели, включающий «внутренние» характеристики моделируемого объекта (физико-механические константы материалов, геометрические размеры конструкции, размеры сечений конструктивных элементов и т. п.).

Задача оптимизации конструкции по массе формулируется следующим образом: найти значения структурных параметров p , обеспечивающих минимум критерия качества (массы) при условии, что параметры состояния q удовлетворяют системе заданных ограничений (по прочности, жесткости и устойчивости и т. д.).

Формально задача оптимизации конструкции по массе на основе модели (1) может быть поставлена в следующем виде.

Известно:

- начальные значения структурных параметров модели X_0 ,
- вектор переменных воздействий r ,
- модель реакции конструкции на воздействия $q = K(p)r$.

Требуется определить: структурные параметры модели $X \subseteq p$, при которых выполняются ограничения структурных параметров $F(p) \geq 0$ и ограничения параметров состояния $\Phi(q) \geq 0$, обеспечивающие минимум целевой функции $M(p) \rightarrow \min$. В качестве целевой функции $M(p)$ выбирается масса конструкции.

В формализованном виде задача оптимизации силовой конструкции по массе будет иметь следующий вид.

В области допустимых решений Ω , принадлежащей n -мерному пространству варьируемых проектных параметров x_i , требуется найти точку X с координатами (x_1, x_2, \dots, x_n) , в которой функция массы n переменных принимает минимальное значение:

$$z(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min, \quad (2)$$
$$\Omega \in R^n$$

где $z(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — целевая функция; x_i — варьируемые проектные параметры конструкции; Ω — область допустимых решений, определяемая системой из N ограничений — неравенств структурных параметров и параметров состояния конструкции,

$$\Omega: \begin{cases} \omega_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ \omega_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ \dots \\ \omega_N(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ x_1 > 0, \\ x_2 > 0, \\ \dots \\ x_n > 0. \end{cases} \quad (3)$$

При решении задач оптимизации сетчатых анизотридных конструкций в качестве переменных состояния выступают прочность, жесткость и устойчивость конструкций.

Условия на прочность заключаются в непревышении максимальными нормальными напряжениями предела прочности материала на растяжение (сжатие), а максимальными напряжениями поперечного сдвига — предела прочности на сдвиг для всех сечений ребер конструкции.

Условия на общую устойчивость подразумевают, что заданная нагрузка не превышает критическую, приводящую к потере устойчивости. Дополнительное условие на осесимметричную устойчивость обусловлено тем, что предыдущее условие не учитывает данную форму потери устойчивости.

Условие на местную потерю устойчивости ограничивает сжимающие силы в отрезках ребер между точками пересечения эйлеровой критической силой.

Область допустимых решений (3) для задачи оптимального проектирования сетчатых анизотридных конструкций, с учетом безразмерности функций ограничений будет иметь вид

$$\Omega: \begin{cases} \frac{\sigma_{кр} - \sigma_i(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sigma_{кр}} \geq 0, \\ \frac{u_{кр} - u_i(x_1, x_2, \dots, x_n)}{u_{кр}} \geq 0, \\ 1 - \lambda_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ x_j > 0. \end{cases} \quad (4)$$

где $\sigma_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — напряжения в i -м конечном элементе; $\sigma_{кр}$ — прочность материала; $u_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — перемещения в i -м конечном элементе; $u_{кр}$ — жесткость конструкции; $\lambda_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — собственные числа.

Основой алгоритма [8] является расчет минимума целевой функции на основе симплексного поиска. Для работы данного алгоритма используется математическая модель, в которой модель объекта оптимизации представлена посредством множества ограничений в виде аппроксимации кусочно-гладкой границы аппаратом R -функций. В алгоритме для описания множества кусочно-гладких границ области допустимых решений используется единый выпуклый R -предикат. Таким образом, в модифицированном алгоритме симплексного поиска целевой функцией, определяющей направление поиска, является суперпозиция исходной целевой функцией и единого R -предиката. Симплекс считается связанным с ближайшими границами через упругие связи, реакция которых определяет коррекцию направления поиска решения (направление движения симплекса).

Алгоритм содержит следующие шаги (в общем случае, когда начальная точка алгоритма является произвольной).

Шаг 1. Задать проектные параметры x_i конструкции, определяющие n -мерное пространство переменных задачи оптимизации.

Шаг 2. Задать систему ограничений-неравенств, определяющих область допустимых решений.

Шаг 3. Задать точку $X_0 \in R_n$, которая определяет симплекс Δ^0 (многогранник n -мерного пространства) на нулевом шаге.

Шаг 4. В каждом узле симплекса вычисляется сумма его координат, умноженных на коэффициент $R = -\sum \nabla \omega_i \bar{\omega}_i$, где ω_i — нормализованный предикат доминантного ограничения; $\bar{\omega}_i$ — его среднее арифметическое значение. Когда все функции из области допустимых значений положительны во всех вершинах симплекса, начальное приближение симплекса считается найденным.

Шаг 5. Далее поиск продолжается в области допустимых решений при фиксированном размере симплекса. Поиск продолжается, пока все доминанты не уменьшатся до заданного порогового значения.

На следующем этапе симплекс перестраивают с уменьшением размера в 2 раза, и весь процесс поиска повторяется. Поиск завершается, когда размеры симплекса становятся меньше заданного значения погрешности ϵ . Окончательным решением является точка, в которой значение всех доминант (расстояний до доминантных ограничений) обращается в нуль, т. е. находится точка минимума суммы квадратов доминант.

Общая блок-схема работы алгоритма оптимального проектирования изображена на рис. 4.



Рис. 4. Общая схема алгоритма оптимального проектирования сетчатых анизотридных конструкций

Тестирование разработанного алгоритма оптимизации с учетом множества ограничений на основе модифицированного симплексного метода на контрольных примерах и задаче определения оптимальных геометрических параметров консольной балки показало:

- получена сходимость численного решения к искомой точке, погрешность вычисления координат оптимума не превышает размеров симплекса;

- алгоритм позволяет получить решение задачи оптимизации при наличии «двойникования» границ (совпадения границ разных ограничений) и угловых точек на границе области допустимых значений;

- результаты численного расчета согласуются с аналитическими решениями, последовательность приближенных решений сходится к аналитическим решениям.

Представленный выше алгоритм оптимального проектирования сетчатых анизотридных конструкций реализован в пакете прикладных программ «Композит НК Анизотрид» [9]. Общая схема взаимодействия программных модулей для оптимального проектирования представлена на рис. 5. Эта схема иллюстрирует использование аппроксимационных зависимостей как функций ограничений. Аппроксими-

Решение задачи оптимального проектирования конструкции с нарушением регулярной структуры ребер. Рассмотрим решение задачи оптимизации для сетчатой оболочечной конструкции с нарушениями регулярной структуры ребер.

В качестве исследуемой конструкции была выбрана цилиндрическая оболочка сетчатой структуры с приложенной к верхней кромке сжимающей силой. Радиус оболочки составлял $R = \frac{64}{\pi} l_k$, где l_k — высота элементарной ячейки конструкции. Высота оболочки $L = 1,96R$. Нагрузка на одну пару спиральных ребер бралась из условия $\sigma_0 = 1$, где σ_0 — отношение приложенной силы к суммарной площади поперечных сечений спиральных ребер. Оребрение конструкции состояло из 64 пар спиральных ребер и 21 кольцевого ребра. Кольцевые и продольные ребра были выполнены парными. Расстояние между спиральными ребрами по окружности равнялось удвоенному расстоянию между осями пар кольцевых ребер. Толщина спиральных и кольцевых ребер совпала и была равна $0,036R$. Однослойная обшивка имела толщину $0,0024R$ и была выполнена методом непрерывной намотки из композиционного материала со следующими усредненными физико-механическими характеристиками:

модули упругости $E_1 = E_2 = 3000$ кгс/мм², модуль сдвига $G = 500$ кгс/мм², коэффициент Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = 0,2$. Конструкция включала в себя два шестиугольных некомпенсированных выреза (рис. 6).

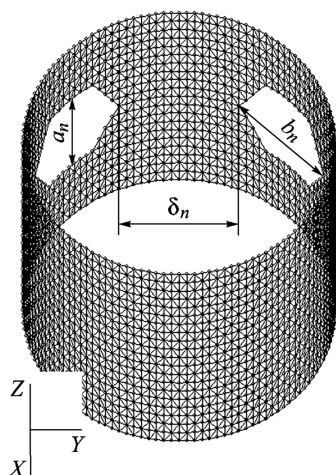


Рис. 6. Общий вид оребренной оболочки с двумя шестиугольными вырезами

Параметрами оптимизации были выбраны: фактор x_1 — высота выреза a_n , фактор x_2 — ширина выреза b_n и фактор x_3 — расстояние между вырезами δ_n .

Сетчатая конструкция имеет следующие габаритные и топологические параметры:

Высота конструкции L , мм	1600
Внешний радиус основания R , мм	815
Число пар спиральных ребер m_n	64
Число кольцевых ребер m_c	21
Высота сетчатой структуры h , мм	30
Толщина спирального ребра δ_h , мм	7,5
Толщина кольцевого ребра δ_c , мм	7,5
Толщина обшивки h_0 , мм	2

Представим функцию массы как

$$z(x_1, x_2, x_3) = M_s - 2M_n(x_1, x_2), \quad (5)$$

где M_s — масса оребренной оболочки без вырезов; M_n — масса сетчатой структуры с обшивкой, имеющей формы и размер выреза. Причем расстояние между вырезами (фактор x_3) не оказывает влияния на целевую функцию. Поскольку конструкция выполнена методом непрерывной намотки из одного материала, то в качестве целевой функции также может быть использован объем конструкции. Тогда

$$z(x_1, x_2, x_3) = V_s - 2V_n(x_1, x_2), \quad (6)$$

где V_s — масса оребренной оболочки без вырезов; V_n — масса сетчатой структуры с обшивкой, имеющей формы и размер выреза.

Область ограничений будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\sigma_s| < \sigma_{кр}^0, \\ |\sigma_t| < \sigma_{кр}^0, \\ |\sigma_h| < \sigma_{кр}, \\ |\sigma_c| < \sigma_{кр}, \\ \delta_n < 2\pi R - 2b_n, \\ b_n < \pi R, \\ 0 < a_n < L, \\ b_n > 0, \\ \delta_n > b_n, \end{array} \right. \quad (7)$$

где σ_s — напряжения по образующей в обшивке; σ_t — напряжения в обшивке; σ_h — напряжения в спиральных ребрах; σ_c — напряжения в кольцевых ребрах; $\sigma_{кр}$ — предел прочности в реберной структуре; $\sigma_{кр}^0$ — предел прочности в обшивке конструкции.

Моделирование и все численные расчеты (расчет напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов, интерпретация данных вычислительного эксперимента и оптимальный расчет) проводились в пакете программ «Композит НК Анизотрид». Модель сетчатой оболочки без вырезов содержит 10752 конечных элемента и 2688 узлов. Анализ приведенных полей напряжений (рис. 7) конструкции с учетом решения задачи оптимизации сетчатой структуры показывает, что наибольших значений напряжения в обшивке и реберной структуре конструкции достигают вблизи вырезов и в зоне между вырезами.

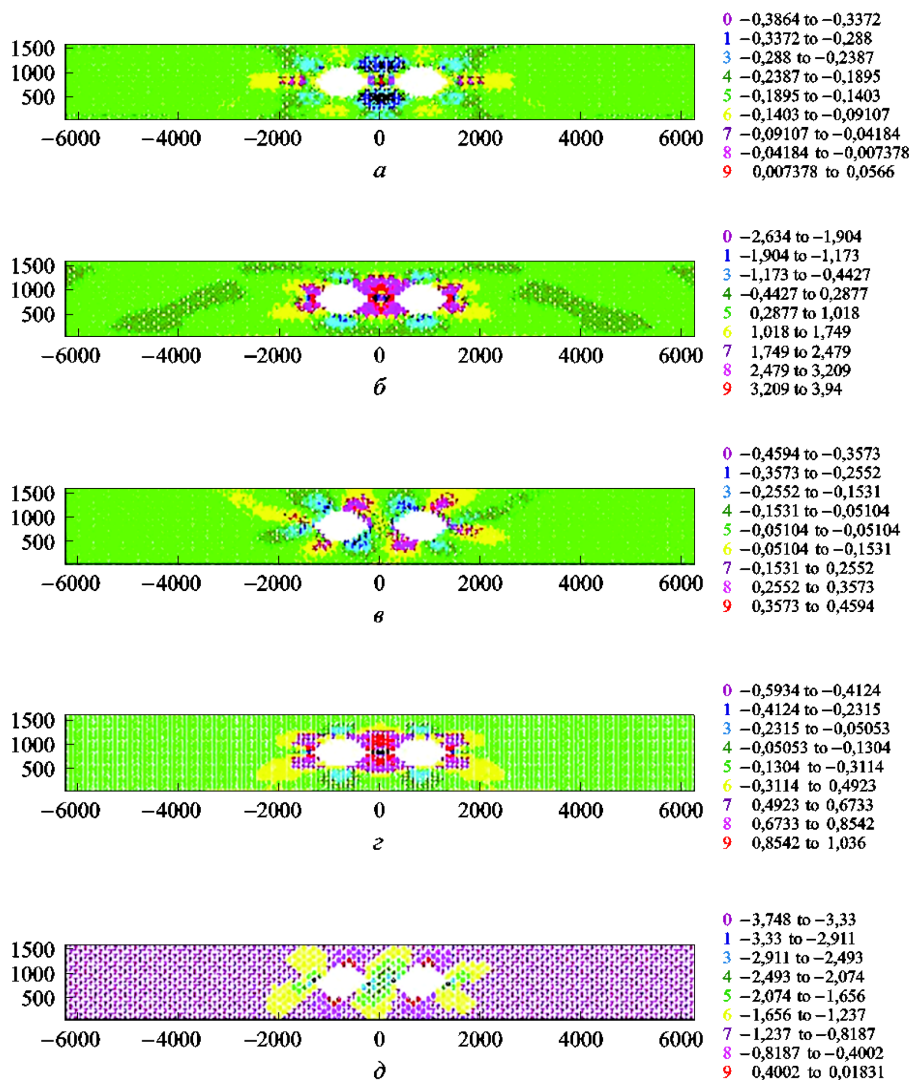


Рис. 7. Результаты численного расчета:

а — поля напряжений σ_x в обшивке конструкции; *б* — поля напряжений σ_y в обшивке конструкции; *в* — поля напряжений σ_n в обшивке конструкции; *г* — поля напряжений σ_s в кольцевых ребрах конструкции; *д* — поля напряжений σ_s в спиральных ребрах конструкции

Для построения функций ограничений проводился трехфакторный численный эксперимент 3^N . Значение фактора x_1 варьировалось в пределах от 3 до 5 элементарных ячеек сетчатой структуры с шагом 1, факторы x_2 — от 8 до 18 элементарных ячеек, фактор x_3 — от 18 до 32 элементарных ячеек. Результаты численных расчетов в точках план-матрицы представлены в таблице. Кроме того, в таблице приведен объем V_n одной сетчатой структуры с обшивкой, имеющей формы и размер выреза. Объем конструкции без вырезов составляет $6,36 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$.

Результаты численного моделирования

Параметры модели			Объем $V_n, \text{мм}^3$	Напряженно-деформированное состояние модели							
a_n	b_n	δ_n		Обшивка				Реберная структура			
				$\sigma_s, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_t, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{h_1}, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_c, \text{кгс/мм}^2$				
<i>Результаты вычислительного эксперимента</i>											
3	8	18	227695,5	-0,306	0,0369	-1,813	3,591	-3,445	0,1844	-0,337	0,952
3	8	32	227695,5	-0,304	0,0298	-1,782	3,591	-3,454	0,1789	-0,338	0,954
3	18	18	519863,1	-0,977	0,7361	-7,958	13,47	-9,301	1,696	-1,168	2,606
3	18	32	519863,1	-0,652	0,7811	-5,298	11,608	-10,28	1,539	-1,322	2,977
5	8	18	280698,2	-0,292	0,0573	-2,575	3,734	-3,606	0,0207	-0,393	0,995 7
5	8	32	280698,2	-0,296	0,013	-2,53	3,715	-3,621	0,0164	-0,397	0,996 5
5	18	18	602989,4	-0,954	0,9406	-7,114	13,3	-9,999	1,8824	-1,438	2,726 3
5	18	32	602989,4	-0,696	0,825	-6,704	13,348	-10,83	1,6088	-2,196	3,923
<i>Результаты численного моделирования для результата оптимизации</i>											
4	6	8	232750,93	-0,386	0,0566	-1,753	3,194	-3,148	0,018	-0,333	1,04

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает линейную зависимость значения целевой функции от варьируемых параметров. По данным в таблице видно, что увеличение размера крышек конструкции приводит к увеличению напряжений в структурных элементах.

Проведение вычислительного эксперимента позволяет представить функции ограничений в виде нелинейных функций. Таким образом, ограничения по прочности, полученные из результатов вычислительного эксперимента, имеют следующий вид:

для спиральных ребер

$$\left| -15,253 + \frac{13,262}{x_3} + \frac{65,074}{x_2} + \frac{2,562}{x_1} \right| \leq 100; \quad (8)$$

$$\left| 2,2446 + \frac{3,762}{x_3} - \frac{15,259}{x_2} + \frac{0,534}{x_1} \right| \leq 100; \quad (9)$$

для кольцевых ребер

$$\left| -2,698 + \frac{5,627}{x_3} + \frac{10,4599}{x_2} + \frac{1,593}{x_1} \right| \leq 100; \quad (10)$$

$$\left| 4,809 - \frac{8,895}{x_3} - \frac{19,657}{x_2} - \frac{1,094}{x_1} \right| \leq 100; \quad (11)$$

для обшивки

$$\left| -0,8857 - \frac{5,18}{x_3} + \frac{5,12}{x_2} - \frac{0,006}{x_1} \right| \leq 50; \quad (12)$$

$$\left| 1,464 + \frac{2,097}{x_3} - \frac{11,698}{x_2} - \frac{0,39}{x_1} \right| \leq 50; \quad (13)$$

$$\left| -8,999 - \frac{25,809}{x_3} + \frac{47,573}{x_2} + \frac{2,082}{x_1} \right| \leq 50; \quad (14)$$

$$\left| 18,282 + \frac{8,373}{x_3} - \frac{90,616}{x_2} - \frac{1,986}{x_1} \right| \leq 50. \quad (15)$$

Учитывая все ограничения по прочности (8)–(15) и габаритам конструкции, область решения (7) задачи оптимизации будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\pi R - 2b_n - \delta_n > 0, \\ \pi R - b_n > 0, \\ a_n > 0, \\ b_n > 0, \\ \delta_n - b_n > 0, \\ L - a_n > 0, \\ 100 - \left| -15,253 + \frac{13,262}{x_3} + \frac{65,074}{x_2} + \frac{2,562}{x_1} \right| > 0, \\ 100 - \left| 2,2446 + \frac{3,762}{x_3} - \frac{15,259}{x_2} + \frac{0,534}{x_1} \right| > 0, \\ 100 - \left| -2,698 + \frac{5,627}{x_3} + \frac{10,4599}{x_2} + \frac{1,593}{x_1} \right| > 0, \\ 100 - \left| 4,809 - \frac{8,895}{x_3} - \frac{19,657}{x_2} - \frac{1,094}{x_1} \right| > 0, \\ 50 - \left| -0,8857 - \frac{5,18}{x_3} + \frac{5,12}{x_2} - \frac{0,006}{x_1} \right| > 0, \\ 50 - \left| 1,464 + \frac{2,097}{x_3} - \frac{11,698}{x_2} - \frac{0,39}{x_1} \right| > 0, \\ 50 - \left| -8,999 - \frac{25,809}{x_3} + \frac{47,573}{x_2} + \frac{2,082}{x_1} \right| > 0, \\ 50 - \left| 18,282 + \frac{8,373}{x_3} - \frac{90,616}{x_2} - \frac{1,986}{x_1} \right| > 0. \end{array} \right. \quad (16)$$

Результатом работы алгоритма оптимизации является вектор (7,4; 5,45; 4,15). При проектировании технологии производства физический смысл переменных и технологические возможности должны быть учтены. В данной задаче параметры являются размерами выреза, которые измеряются в элементарных ячейках конструкции. Следовательно, значения параметров должны быть целочисленными, поэтому результаты работы были скорректированы.

Таким образом, решением рассматриваемой задачи является следующее: расстояние между вырезами равно 8 элементарным ячейкам, ширина выреза 6 элементарных ячеек и высота выреза 4 элементарные ячейки. Модель анизотридной конструкции с данными параметрами была построена. Результаты численного расчета представлены в таблице.

Результаты численного расчета напряженного состояния этой конструкции показали, что значения максимальных напряжений не превышают критических значений по прочности конструкции и являются минимальными среди результатов численных расчетов в вычислительном эксперименте. С учетом ограничений по прочности значение целевой функции для расчетной модели является минимальным (объем конструкции равен $5,89 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$).

Результаты численного расчета напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом решения задачи оптимизации сетчатой структуры представлены на рис. 7.

Заключение. Разработанный и приведенный алгоритм решения задачи оптимизации проектных параметров сетчатых анизотридных конструкций по массе с ограничениями на структурные параметры и переменные состояния применим как для анизотридных сеток с равномерной структурой [11], так и к сетчатым анизотридным конструкциям, имеющим вырезы, усиления и другие нарушения регулярности. Этот алгоритм может быть применен для многоэлементных конструкций строительного и машиностроительного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев В.В., Барынин Б.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И. Анизотридные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложения к космической технике. *Композиты и наноструктуры*, 2009, № 3, с. 38–50.
- [2] Васильев В.В., Лопатин А.В. Теория сетчатых и подкрепленных композитных оболочек. *Механика конструкций из композиционных материалов*. Новосибирск, 1984, с. 31–36.
- [3] Чаускин А.Ю., Старов А.В., Карасев Г.М. Расчет и конструирование башенных сооружений комбинированного типа. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*, 2013, № 32 (51), с. 49–54.

- [4] Васильев В.В., Разин А.Ф. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций. *Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении*, 2006, вып. 1 (142)–2 (143), с. 3–6.
- [5] Соломонов Ю.С., Васильев В.В., Георгиевский В.П. Композитные материалы в ракетной и аэрокосмической технике. *Труды Моск. ин-та теплотехники*, 2006, т. 8., ч. 1, с. 7–25.
- [6] Васильев В.В., Грудзин А.Л., Петроковский С.А., Разин А.Ф. Сетчатый композитный отсек для стыковки ракеты-носителя с космическим аппаратом. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 1999, № 9, с. 44–47.
- [7] Казначеева О.К., Каледин В.О. *Идентификация параметров упругости и жесткости конструкций из армированных материалов*. Новочеркасск, ЛИК, 2012, 135 с.
- [8] Каледин В.О., Штейнбрехер О.А. Алгоритм оптимизации многоэлементных конструкций с ограничениями по прочности и габаритам. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2016, № 3, с. 113–115.
- [9] Каледин В.О., Крюкова Я.С., Нагайцева Н.В., Равковская Е.В. Программная система для алгоритмизации численного решения задач механики сплошной среды. *Известия Алтайского государственного университета*, 2014, № 1–1 (81), с. 161–164.
- [10] Бурнышева Т.В. Применение методологии вычислительного эксперимента в задачах проектирования и диагностики анизотридных конструкций космических летательных аппаратов. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2014, № 6, с. 98–102.
- [11] Штейнбрехер О.А., Бурнышева Т.В. Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10, с. 2.
DOI: [org/10.18698/2308-6033-2017-10-1688](http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1688)

Статья поступила в редакцию 10.01.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. Параметрическая оптимизация анизотридных оболочек нерегулярной структуры. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-8-1910>

Бурнышева Татьяна Витальевна — д-р техн. наук, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники им. В.К. Буторина Новокузнецкого филиала (института) Кемеровского государственного университета. Область научных интересов: численные методы, математическое моделирование статике, устойчивости и динамики композитных конструкций. e-mail: tburn@mail.ru

Штейнбрехер Ольга Александровна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники им. В.К. Буторина Новокузнецкого филиала (института) Кемеровского государственного университета. Область научных интересов: математическое моделирование статике, устойчивости и динамики композитных конструкций. e-mail: olga_sht@mail.ru

Parametric optimization of anisogrid shells of irregular structure

© T.V. Burnysheva, O.A. Shteinbreher

Novokuznetsk branch of Kemerovo State University,
Novokuznetsk, 654041, Russia

The paper focuses on an approach to solving the problem of parametric optimization of anisogrid mesh shells with an irregular structure. Mesh structures are widely used in building and engineering. This study deals with the optimal design of such structures used in aerospace industry. The problem of optimal design of mesh structures is relevant, as it makes it possible to increase the efficiency of their use, minimizing the weight, provided the strength and stability conditions are met. In our work we formulate the problem of optimal design of mesh structures in general form, and introduce an optimization algorithm based on the simplex search method in which we use a partial predicate of a feasible region to describe the non-convex smooth areas of boundaries. The results of solving the optimization problem for a particular structure with a violation of the regularity of the rib structure are given. Findings of research show that the considered algorithm can be used for optimal design of both regular and non-regular mesh structures.

Keywords: optimal design of structures, mesh structure, minimum mass, strength, stability, optimization algorithm

REFERENCES

- [1] Vasiliev V.V., Barynin B.A., Razin A.F., Petrakovskiy S.A., Khalimanovich V.I. *Kompozity i Nanostrukury — Composites and Nanostructures*, 2009, no. 3, pp. 38–50.
- [2] Vasiliev V.V., Lopatin A.V. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy — Journal on Composite Mechanics and Design*, 1984, pp. 31–36.
- [3] Chauskin A.Yu., Starov A.V., Karasev G.M. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i arkhitektura — Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2013, no. 32 (51), pp. 49–54.
- [4] Vasiliev V.V., Razin A.F. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 15. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii (Military Enginery. Ser. 15. Composite non-metallic materials in mechanical engineering)*, 2006, no. 1 (141)–2 (143), pp. 3–6
- [5] Solomonov Yu.S., Vasiliev V.V., Georgievskiy V.P. *Trudy Moskovskogo instituta teplotekhniki (Proceedings of Moscow Institute of Thermal Technology)*, 2006, vol. 8, part 1, pp. 7–25.
- [6] Vasiliev V.V., Grudzin A.L., Petrokovskiy S.A., Razin A.F. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal «Polet» — All-Russian scientific and technical journal “Polet” (Flight)*, 1999, no. 9, pp. 44–47.
- [7] Kaznacheeva O.K., Kaledin V.O. *Identifikatsiya parametrov uprugosti i zhestkosti konstruksiy iz armirovannykh materialov [Identification of parameters of elasticity and rigidity of structures made of reinforced materials]*. Novocherkassk, LIK Publ., 2012, 135 p.
- [8] Kaledin V.O., Shteinbreher O.A. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya — Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2016, no. 3, pp. 113–115.

- [9] Kaledin V.O., Kryukova Ya.S., Nagaytseva N.V., Ravkovskaya E.V. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta — Izvestiya of Altai State University*, 2014, no. 1–1 (81). pp. 161–164.
- [10] Burnysheva T.V. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya — Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2014, no. 6, pp. 98–102.
- [11] Shteinbreher O.A., Burnysheva T.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 10, pp. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1688

Burnysheva T.V. (b. 1972) graduated from Kemerovo State University in 1995, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of Department of Informatics and Computer Engineering, Novokuznetsk branch of Kemerovo State University. Research interests: numerical methods, mathematical modeling of statics, dynamics and stability of composite structures. e-mail: tburn@mail.ru

Shteinbreher O.A. (b. 1990) graduated from Kemerovo State University in 2011, Cand. Sc. (Eng.), Assist. Professor, Department of Informatics and Computer Engineering, Novokuznetsk branch of Kemerovo State University. Research interests: mathematical modeling of statics, dynamics and stability of composite structures. e-mail.ru: olga_sht@mail.ru