

Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции

© О.А. Штейнбрехер, Т.В. Бурнышева

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

Приведена задача оптимального проектирования сетчатой цилиндрической конструкции. Такие конструкции широко применяются в аэрокосмической отрасли. Оптимальное проектирование этих конструкций позволяет повысить эффективность их использования, минимизировав массу, при соблюдении условий на прочность и устойчивость. Приведена постановка задачи оптимального проектирования сетчатых конструкций в общем виде. Рассмотрено применение различных алгоритмов оптимального проектирования с использованием известных аналитических зависимостей. Алгоритм оптимизации основан на методе симплексного поиска, в котором для описания невыпуклых гладких участков границ используется частичный R -предикат допустимой области. Представлены результаты решения задачи оптимизации для конкретной конструкции различными методами и результаты расчета напряженно-деформированного состояния соответствующих моделей. Расхождения результатов обусловлены различным набором ограничений, применяемых в рассматриваемых методах.

Ключевые слова: оптимальное проектирование конструкций, сетчатая цилиндрическая конструкция, минимум массы, прочность, устойчивость, алгоритм оптимизации, R -функции

Введение. Сетчатые конструкции из композиционных материалов [1] являются одним из видов конструкций аэрокосмического назначения и представляют собой регулярную структуру спиральных и кольцевых ребер (рис. 1). Поиск оптимальных параметров — часть подготовки эскизного проекта, который предшествует этапу рабочего проектирования, а именно опытно-конструкторским работам, созданию опытных образцов, испытаний и выпуску серийной продукции. Данные, полученные на этапе оптимального проектирования, позволяют сократить временные и материальные затраты на этапах испытаний и избежать разрушения серийных конструкций при их эксплуатации.

К настоящему времени достаточно проработаны и используются методы оптимального проектирования сетчатых конструкций на основе континуальных моделей. Однако отличительной особенностью современных анизотридных конструкций является нарушение регулярности реберной структуры, наличие вырезов и их усилений в виде окантовок. Моделирование и расчет таких конструкций на прочность базируются на полном дискретном моделировании. Данный подход позволяет получить более достоверные результаты при расчете элементов конструкций, расположенных вблизи вырезов и их усилений.

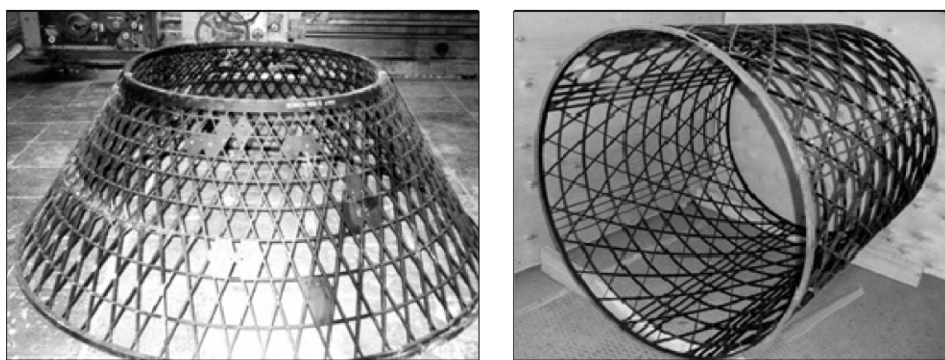


Рис. 1. Сетчатые оболочечные конструкции

Представление сетчатой конструкции в виде континуальной модели традиционно используется при решении задачи оптимизации изделия по массе. Методы оптимизации на основе дискретного моделирования проработаны недостаточно. Разработка подходов (методов и инструментов) к решению задачи оптимизации анизотридных конструкций по массе с учетом полной дискретизации элементов является актуальной проблемой.

Цель данной работы — сравнение результатов различных алгоритмов оптимизации для сетчатой цилиндрической оболочки.

Постановка задачи оптимального проектирования сетчатых конструкций. Типовая сетчатая конструкция характеризуется следующими параметрами (рис. 2): толщиной сетчатой структуры h , толщинами спиральных и кольцевых ребер δ_c и δ_k , расстояниями между спиральными ребрами a_c (по нормали к оси ребра) и между кольцевыми ребрами a_k , углом наклона спиральных ребер (по отношению к образующей).

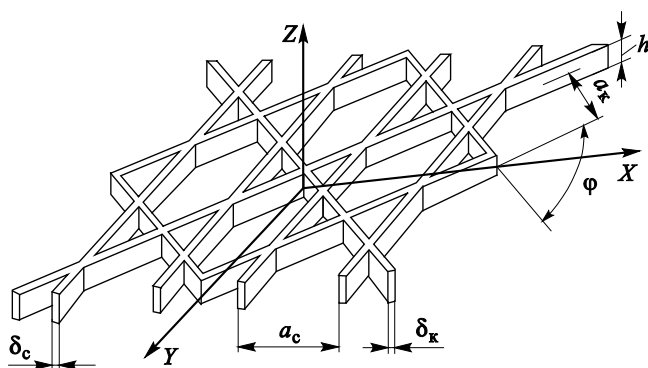


Рис. 2. Структура ребер сетчатой конструкции

При известных проектных параметрах сетчатой оболочки — радиусе R и длине L , физико-механических параметрах материала и значении критической сжимающей силы F остальные параметры конструкции могут быть определены исходя из оптимального значения параметров.

При решении задачи оптимального проектирования силовых конструкций в качестве одного из критериев оптимальности рассматривается минимум массы конструкции, при котором должны выполняться условия на прочность и общую, местную и осесимметричную устойчивость.

Условия на прочность заключаются в непревышении максимальными нормальными напряжениями предела прочности материала на растяжение (сжатие), а также 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.

С учетом приведенных обозначений можно представить целевую функцию в виде суммы масс спиральных и кольцевых ребер [1]:

$$M = 2\pi RLh\rho_h \left(2m_h \bar{\delta}_h + m_c \bar{\rho}_c \bar{\delta}_c \right), \quad (1)$$

где $\bar{\delta}_h = \frac{\delta_h}{a_h}$, $\bar{\rho}_c = \frac{\rho_c}{\rho_h}$ — плотность материалов ребер; $\bar{\delta}_c = \frac{\delta_c}{a_c}$.

Ограничения по прочности, устойчивости и дополнительное условие на положительность размеров конструктивных элементов для вектора варьируемых параметров \mathbf{p} будут иметь вид:

$$\begin{aligned} |\sigma(p)| &\leq \sigma_{кр}; \\ |\lambda(p)| &\leq 1; \\ p_i &\geq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, задача оптимизации сводится к задаче нахождения минимума функции (1) при данных ограничениях (2).

Поиск оптимальных параметров — минимума целевой функции с учетом ограничений — проводится методами условной оптимизации.

Методы решения задачи оптимального проектирования сетчатых конструкций. Особенность оптимизации сетчатых конструкций заключается в большом числе ограничений, которые требуется учесть. Для сетчатой цилиндрической оболочки используются аналитические зависимости по выбору оптимальных параметров при действии сжимающих нагрузок, обеспечивающих минимальную массу при достаточной прочности, местной и общей устойчивости [2].

Кроме того, можно осуществлять расчет критерия оптимальности и ограничений циклически при изменении значений параметров, определяющих высоту сечения ребер, угол наклона спиральных ребер по отношению к образующей и число пар спиральных ребер в заданных пределах. Исходные данные для расчета — размеры цилиндрической оболочки, такие как радиус и длина, приложенная осевая нагрузка и физико-механические характеристики материалов спиральных и кольцевых ребер оболочки.

При расчете для каждого набора варьируемых параметров выбирается максимальное значение ширины сечения спирального ребра, рассчитанного исходя из ограничений. Используя полученное значение, на каждом шаге рассчитывается параметр, являющийся критерием оптимальности, — масса конструкции. Набор варьируемых параметров и вычисленного значения ширины сечения спирального ребра, соответствующие минимальному значению массы конструкции, являются оптимальными.

Число варьируемых параметров можно уменьшить, задав высоту сечения, угол наклона спиральных ребер и(или) число пар спиральных ребер.

Значение ширины сечения спирального ребра рассчитывается по формулам, выраженным из ограничений критической силы P по прочности спиральных ребер при сжатии и общей и местной формам потери устойчивости оболочки при осевом сжатии, приведенным в работе [1].

Аналитические методы, разработанные для конкретных видов конструкций, не учитывают такие их особенности, как вырезы, неравномерную толщину сетчатой структуры и другие конструктивные элементы. В работе [3] предложен метод, основанный на алгоритме симплексного поиска, в котором для описания невыпуклых гладких участков границы строится частичный R -предикат [4] допустимой области, учитывающий только ближайšie к текущей точке участки границы (доминанты). Проверка данного алгоритма на задачах, имеющих аналитические решения, приведена в работах [3, 5] и показывает применимость данного алгоритма для оптимизации многоэлементных конструкций с ограничениями по прочности, устойчивости и габаритным размерам.

Алгоритм оптимизации. Поставим задачу оптимизации следующим образом: отыскивается минимум целевой функции (1) $z(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — массы конструкции. Решением будет точка x с координатами (x_1, x_2, \dots, x_n) в области допустимых решений Ω , которая определяется системой из N ограничений-неравенств:

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

Значение каждой из функций в системе (3) определяет меру расстояния текущей (пробной) точки от соответствующего участка границы. Поэтому на шаге поиска можно построить частичный предикат, в который входят только несколько наименьших функций из данной системы (3) — «доминантных» ограничений:

$$\omega(x_1, x_2, \dots, x_n) = \omega_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \wedge_{\alpha} \omega_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \wedge_{\alpha} \dots \quad (4)$$

(функции в (3) предполагаются упорядоченными по возрастанию).

Далее введем вспомогательную целевую функцию

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_n) = z(x_1, x_2, \dots, x_n) - (\nabla \omega \nabla z) \omega, \quad (5)$$

градиент которой направлен вдоль поверхности уровня предиката ω . Безусловный минимум вспомогательной функции совпадает с условным минимумом целевой функции $z(x_1, x_2, \dots, x_n)$ на границе области допустимых решений.

Следующая пробная точка может быть выбрана на данном шаге поиска перемещением вспомогательной функции в сторону убывания. Для этого вычисляются значения функции (5) в вершинах пробного симплекса, построенного вокруг исходной точки, и отражения «худшей» вершины относительно центра симплекса.

Алгоритм был модифицирован в связи с зацикливанием вблизи острых углов области поиска и «кратных» границ следующим образом. Каждая доминанта заменялась упругой связью, которая действует на перемещаемый симплекс аналогично пружине, нормальной к поверхности $\omega_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, а направление перемещения симплекса корректируется с учетом суммы реакций этих упругих связей. Тогда по мере убывания вспомогательной целевой функции симплекс движется на приблизительно равном расстоянии от доминант вдоль линии Дирихле области поиска и приходит в искомую точку по кратчайшему пути.

Результаты оптимального проектирования. Рассмотрим сетчатую цилиндрическую оболочку со следующими параметрами [6]:

- внутренний радиус $R = 593,5$ мм;
- длина конструкции $L = 1567$ мм;
- сила осевого сжатия $P = 531$ кН;
- модуль упругости вдоль ребра $E = 180$ ГПа;
- прочность ребра при сжатии $\sigma_{\max} = 480$ МПа.

Для данной оболочки с учетом введенных требований по жесткости в работе [6] представлены результаты проектного расчета по аналитическим зависимостям для выбора оптимальных параметров при действии сжимающих нагрузок [2] при фиксированном числе пар спиральных ребер, равном 32.

При фиксировании чисел пар спиральных ребер расчет параметров методом перебора дает следующий результат: угол наклона 36° , высота сечения ребра $13,84$ мм, ширина сечения спирального ребра $3,66$ мм. С учетом физического смысла параметры геометрической структуры можно округлить.

Рассмотрим применение симплексного алгоритма [3] для цилиндрической сетчатой структуры, используя формулы из работы [1] в качестве функций ограничений. Для симплексного метода проводили два расчета: с фиксированным и варьируемым значениями чисел пар спиральных ребер. На рис. 3 серым тоном выделена область допустимых значений в плоскости $\varphi - m_h$ при фиксированных значениях геометрических размеров сечений ребер сетчатой структуры, соответствующих результатам расчета при варьировании всех проектных параметров.

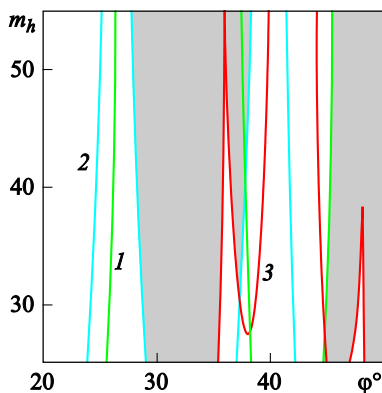


Рис. 3. Область допустимых значений

в плоскости $\varphi - m_h$:

1–3 — ограничения по прочности, по общей устойчивости и по местной устойчивости

С учетом антиградиента целевой функции оптимум находится в точке с координатами (38,5; 49), доминантным ограничением является местная устойчивость конструкции. При варьировании четырех проектных параметров (при вычислении площади кольцевых ребер исходя из предела прочности ребер) алгоритм симплексного поиска дает следующий результат: угол наклона спирального ребра к образующей 38,67°, число пар спиральных ребер 48,86, высота сечения ребра 3,13 мм и ширина спирального ребра 5,234 мм.

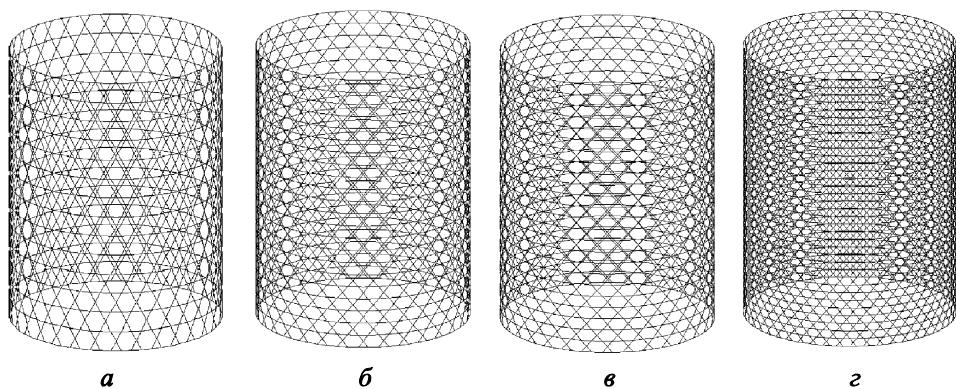


Рис. 4. Топологическая структура сетчатых конструкций, полученная в результате оптимизации:

a — аналитические зависимости по выбору оптимальных параметров ($\varphi = 24,5^\circ$, $m_h = 32$); *b* — циклический перебор по аналитическим зависимостям ($\varphi = 36^\circ$, $m_h = 32$); *v, z* — симплексный поиск с ограничениями, представленными аналитическими зависимостями ($\varphi = 39^\circ$, $m_h = 32$; $\varphi = 38,5^\circ$, $m_h = 49$)

Результаты оптимального проектирования

Номер расчета	Оптимизационный расчет					Объем $V, \text{ м}^3$	Расчет напряженно-деформированного состояния модели				
	φ	m_h	$h, \text{ мм}$	$\delta_h, \text{ мм}$	$\delta_c, \text{ мм}$		$\sigma_{\min}, \text{ кгс/мм}^2$	$\sigma_{\max}, \text{ кгс/мм}^2$	$u_s, \text{ мм}$	$u_n, \text{ мм}$	λ
1	24,5	32	21	6	3	429,9	-26,4	7,1	6	1,8	0,0122
2	36	32	14	4	1	665,9	-67,9	50,8	31	11,5	-0,017
3	39	32	4	8	3,5	130,9	-70,4	55,33	54,8	13,2	0,0122
4	38,5	49	4	5,5	3	177,8	-44,8	39,5	43,1	8,2	0,0111

Топологическая структура сетчатых моделей приведена на рис. 4. В таблице представлены результаты оптимизационного расчета и численных расчетов напряженно-деформированного состояния моделей при осевом сжатии: максимальные значения напряжений в спиральных σ_{\min} и кольцевых σ_{\max} ребрах и максимальные перемещения по образующей u_s и нормали u_n к поверхности, а также первые собственные значения λ . Вычисления выполнены в пакете программ

«Композит-НК» [7, 8] на основе дискретной модели [9]. Для моделирования конструкции использовались конечные элементы типа балки Тимошенко, приложение нагрузки моделировалось с использованием «жесткого» узла [10].

На рис. 5 представлены распределения напряжений в спиральных и кольцевых ребрах конструкции по высоте.

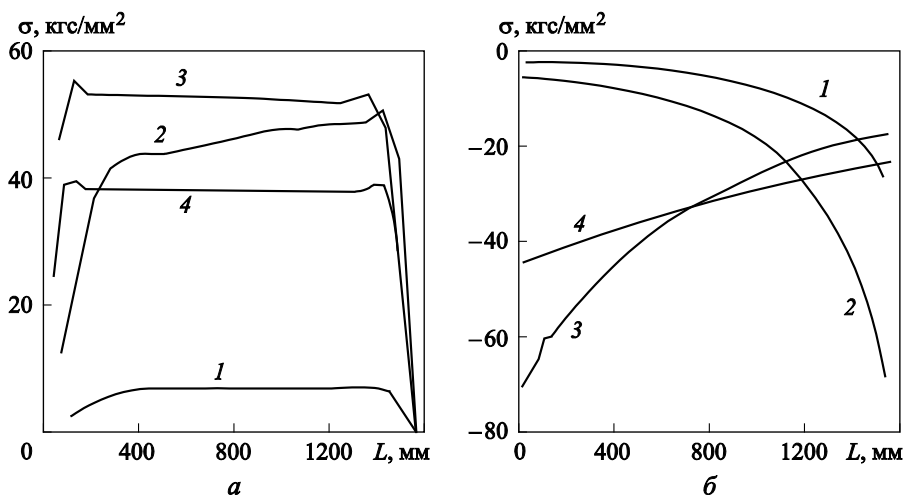


Рис. 5. Распределения напряжений в ребрах конструкции:

a — кольцевые; b — спиральные ребра; 1 — аналитические зависимости по выбору оптимальных параметров; 2 — циклический перебор по аналитическим зависимостям; 3 — симплексный поиск [3] с фиксированным числом спиральных ребер; 4 — симплексный поиск [3]

Расхождения с результатами, представленными в работе [6], обусловлены тем, что значение ширины сечения кольцевого ребра, используемого при расчете сжимающей силы, при оптимальном проектировании заменено его выражением из площади сечения кольцевого ребра, рассчитанного с учетом приложенной нагрузки и предела прочности кольцевых ребер. Кроме того, в работе [6] не представлены все физико-механические параметры материала, и формулы [1] не учитывают ограничения по жесткостям, принятые в расчетах [6].

Вывод. Рассмотрено применение симплексного алгоритма по аналитическим формулам и проведено сравнение полученного результата с вычислениями методом перебора. Для учета большего числа ограничений, например, ограничений по жесткостям, и более точного представления ограничений по устойчивости и прочности в качестве функций ограничений симплексного алгоритма [3] также можно использовать аппроксимационные зависимости, полученные в ходе вычислительного эксперимента [11]. Для обеспечения физического смысла задачи данные функции должны быть представлены в виде обратных зависимостей.

Проведение полнофакторного вычислительного эксперимента в пятимерном пространстве варьируемых параметров достаточно трудозатратное. При отсутствии взаимного влияния факторов можно провести дробнофакторный вычислительный эксперимент, уменьшив тем самым объем численных расчетов. Многочисленные вычислительные эксперименты показывают отсутствие взаимного влияния топологических параметров и параметров геометрических размеров сечения сетчатой структуры для подобных конструкций.

Кроме того, наряду с полнофакторным оптимизационным расчетом можно также рассматривать двухэтапный оптимизационный расчет — определение топологической структуры и размеров поперечного сечения ребра.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев В.В., Барынин Б.А., Разин А.Ф., Халиманович В.И. Анизогридные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложения к космической технике. *Композиты и наноструктуры*, 2009, № 3, с. 38–50.
- [2] Азаров А.В. Оптимальное проектирование композитных сетчатых стержневых элементов космических аппаратов. *Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композитные неметаллические материалы в машиностроении*, 2007, № 2 (147), с. 3–7.
- [3] 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.
- [4] Рвачев В.Л. *Теория R-функций и некоторые ее приложения*. Киев, Наукова думка, 1982, 552 с.
- [5] Штейнбрехер О.А. О решении задачи оптимизации сетчатых конструкций. *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. Новокузнецк, 12–15 апреля 2016 г., СибГИУ. Новокузнецк, Изд-во Сибирского государственного индустриального университета, 2016, с. 149–154.
- [6] Исева О.А., Кравченко Ю.С., Савицкий В.В., Крушеко Г.Г., Пацкова Е.Г. Выбор оптимальной конфигурации при проектировании анизогридных конструкций. *Решетневские чтения: мат. XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*. Красноярск, 09–12 ноября 2016 г., Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., Красноярск, 2016, ч. 1, с. 30–32.
- [7] 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.
- [8] Каледин В.О., Ульянов А.Д. «Композит-НК» — гибкая технология программирования технических расчетов. *Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф.* Прокопьевск, 30–31 марта 2016 г. Прокопьевск, изд-во филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Прокопьевск, 2016, с. 350–352.

- [9] Бурнышева Т.В., Каледин В.О. Сравнение дискретного и континуального подхода к расчету напряженного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом нагружении. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2011, № 4, с. 113–116.
- [10] Каледин В.О., Разин А.Ф., Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А. Интерпретация данных натуральных испытаний оболочечной композитной конструкции при статическом осевом сжатии. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2015, т. 81, № 3, с. 53–58.
- [11] Бурнышева Т.В. Применение методологии вычислительного эксперимента в задачах проектирования и диагностики анизотропных конструкций космических летательных аппаратов. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2014, № 6, с. 98–102.

Статья поступила в редакцию 20.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Штейнбрехер О.А., Бурнышева Т.В. Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1688>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Штейнбрехер Ольга Александровна родилась в 1990 г., окончила Кемеровский государственный университет в 2011 г. Старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники им. В.К. Буторина Новокузнецкого института (филиала) Кемеровского государственного университета. Область научных интересов: математическое моделирование статике, устойчивости и динамики композитных конструкций. e-mail: olga_sht@mail.ru

Бурнышева Татьяна Витальевна родилась в 1972 г., окончила Кемеровский государственный университет в 1995 г. Заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники им. В.К. Буторина Новокузнецкого института (филиала) Кемеровского государственного университета. Область научных интересов: численные методы, математическое моделирование статике, устойчивости и динамики композитных конструкций. e-mail: tburn@mail.ru

Solving the problem of mesh cylindrical structure parametric optimization

© O.A. Shteinbrekher, T.V. Burnysheva

Novokuznetsk institute (branch) of Kemerovo State University,
Novokuznetsk, 654041, Russia

The article considers the problem of optimal design of a mesh cylindrical structure. Such structures are widely used in the aerospace industry. Optimal design of these structures allows increasing the efficiency of their use, minimizing the mass, while observing the conditions for strength and stability. The formulation of the problem of mesh construction optimal design in general form is given. The application of various optimal design algorithms using known analytical dependencies is considered. The optimization algorithm is based on the simplex search method, where a partial R-predicate of the admissible domain is used to describe nonconvex smooth boundary sections. The results of solving the optimization problem for a particular design by various methods and the results of calculating the stress-strain state of the corresponding models are presented. The discrepancies in the results are due to the different set of constraints used in the methods in question.

Keywords: *optimal design of structures, mesh cylindrical structure, minimum mass, strength, stability, optimization algorithm, R-functions*

REFERENCES

- [1] Vasilyev V.V., Barynin B.A., Razin A.F., Khalimanovich V.I. *Kompozity i nanostruktury — Composites and Nanostructures*, 2009, no. 3, c. 38–50.
- [2] Azarov A.V. *Voprosy Oboronnoy tekhniki. Ser. 15. Kompozitnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii — Problems of Defense Technology. Ser. 15. Composite Non-Metallic Materials in Mechanical Engineering*, 2007, no. 2 (147), pp. 3–7.
- [3] Kaledin V.O., Shteinbrekher O.A. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya — Science and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2016, no. 3, pp. 113–115.
- [4] Rvachev V.L. *Teoriya R-funktsiy i nekotorye ee prilozheniya* [Theory of R-functions and some of its applications]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 552 p.
- [5] Shteinbrekher O.A. O reshenii zadachi optimizatsii setchatykh konstruksiy [Solving the problem of mesh structure optimization]. *Trudy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem “Modelirovanie i naukoemkie informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh”*. Novokuznetsk, 12–15 aprelya 2016 g. [Proceedings of IV All-Russia scientific-practical Conference with international participation “Simulation and science-intensive information technologies in engineering and socio-economic systems”. Novokuznetsk, April 12–15, 2016]. Novokuznetsk, Siberian State Industrial University Publ., 2016, pp. 149–154.
- [6] Iseeva O.A., Kravchenko Yu.S. Savitsky V.V., Krusheko G.G., Patskova E.G. Vybora optimalnoy konfiguratsii pri proektirovani anizogridnykh konstruksiy [Choosing the optimal configuration for the design of anisogrid structures]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XX Yubileynoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati generalnogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva*. Krasnoyarsk, 9–12

- noyabrya 2016 g. Chast 1 [Reshetnev's readings: Proceedings of the XX Jubilee International scientific-practical conference dedicated to the memory of the general designer of rocket-space systems academician M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk, November 09-12, 2016. Part 1]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University Publ., 2016, pp. 30–32.
- [7] Kaledin V.O., Krukova Ya.S. Nagaytseva N.V., Ravkovskaya E.V. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta — Proceedings of the Altai State University*, 2014, no. 1–1 (81), pp. 161–164.
- [8] Kaledin V.O., Ulyanov A.D. “Kompozit-NK” — gibkaya tekhnologiya programirovaniya tekhnicheskikh raschetov [“Composite-NK” is a flexible technology for programming engineering calculations]. *Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Perspektivy innovatsionnogo razvitiya ugolnykh regionov Rossii”*. Prokopyevsk 30–31 marta 2016 g. [Proceedings of the V International scientific-practical conference “Prospects for the innovative development of the coal regions of Russia. Prokopyevsk, March 30–31, 2016]. Prokopyevsk, Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch Publ., 2016, pp. 350–352.
- [9] Burnysheva T.V., Kaledin V.O. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya — Science and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2011, no. 4, pp. 113–116.
- [10] Kaledin V.O., Razin A.F., Burnysheva T.V., Shteinbrekher O.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2015, vol. 81, no. 3, pp. 53–58.
- [11] Burnysheva T.V. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya — Science and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2014, no. 6, pp. 98–102.

Shteinbrekher O.A. (b. 1990) graduated from Kemerovo State University in 2011. Senior Lecturer, V.C. Butorin Department of Informatics and Computing Technology, Kemerovo State University, Novokuznetsk institute (branch). Research interests: mathematical modeling of statics, stability and dynamics of composite structures.
e-mail: olga_sht@mail.ru

Burnysheva T.V. (b. 1972) graduated from Kemerovo State University in 1995. Head of the V.C. Butorin Department of Informatics and Computing Technology, Kemerovo State University, Novokuznetsk institute (branch). Research interests: numerical techniques, mathematical modeling of statics, stability and dynamics of composite structures.
e-mail: tburn@mail.ru