

Применение математического моделирования для решения задач оптимизации сетчатых конструкций

Т.В. Бурнышева¹, О.А. Штейнбрехер¹

¹Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета, Циолковского 23, Новокузнецк, Россия, 654041

Аннотация. В работе рассматривается применение математического моделирования для решения задач оптимального проектирования сетчатых конструкций. Для решения задач структурной оптимизации таких конструкций рассматривается методика анализа силовых схем. Предлагается система автоматизации проведения вычислительного эксперимента, моделирования и численного расчета. В работе приведена математическая модель совместного деформирования реберной структуры и обшивки, представлены алгоритмы решения задачи оптимального проектирования. Рассматривается задача выбора оптимального варианта расположения кольцевых ребер в цилиндрической конструкции.

1. Введение

Сетчатые конструкции широко применяются в машиностроении [1-2] и строительстве. В промышленности сетчатые конструкции впервые стал использовать В.Г. Шухов. Башни системы Шухова получили широкое распространение за счет их экономичности, легкости и устойчивости [3]. В настоящее время для проектирования зданий и других строительных конструкций широко применяются сетчатые оболочечные конструкции, конструкции произвольной формы [4] и другие конструкции. Применение сетчатых конструкций широко распространено в авиа- [5] и ракетостроении [1]. Сетчатые анизотридные композиционные оболочки, выступающие составными элементами агрегатов космических летательных аппаратов, относятся к силовым конструкциям, набор структурных элементов которых должен обеспечивать прочность и жесткость оболочки под действующими нагрузками. Отличительной особенностью сетчатых конструкций является система пересекающихся спиральных и кольцевых ребер (рисунок 1).

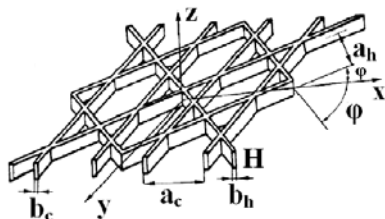


Рисунок 1. Сетчатая структура:

a_h – расстояние между парами спиральных ребер;
 a_c – расстояние между кольцевыми ребрами;
 ϕ – угол наклона спирального ребра к образующей;
 b_h – толщина спирального ребра;
 b_c – толщина кольцевого ребра;
 H – толщина реберной структуры (высота сечения ребер).

Применение сетчатых структуры в машиностроении позволяет понизить массу конструкции при тех же нагрузках. За счет этого повышается масса полезного груза и, следовательно, повышается экономическая эффективность конструкции.

Оптимальное проектирование сетчатых конструкций позволяет повысить эффективность и экономичность, в том числе за счет снижения избыточного запаса прочности. Такие задачи имеют 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.

2. Задачи оптимального проектирования сетчатых конструкций

Задача оптимизации по массе многоэлементной статически неопределимой конструкции является однокритериальной. Ограничения по прочности, жесткости и устойчивости таких конструкций выражаются через параметры напряженно-деформированного состояния при расчетных нагрузках, которые, в свою очередь, зависят от варьируемых проектных параметров конструкции. Поскольку параметры напряженно-деформированного состояния зависят от положения точки (являются полями перемещений, напряжений и деформаций), ограничения по прочности и жесткости должны формулироваться для достаточно большого числа характерных точек конструкции. Таким образом, в формулировку задачи может входить большое число ограничений, на несколько порядков превышающее число варьируемых параметров.

Математическую модель статического деформирования силовой конструкции на уровне «черного ящика» [6], в которой внутреннее строение моделируемого объекта не раскрывается, и фиксируются только реакция объекта на приложенные воздействия:

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

Здесь 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.).

В общем виде задачу оптимизации конструкции по массе можно сформулировать таким образом: найти значения структурных параметров p , обеспечивающих минимум массы конструкции при условии, что параметры состояния q удовлетворяют системе заданных ограничений.

Формально задача оптимизации конструкции по массе может быть поставлена в следующем виде.

Известно:

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

Требуется определить: структурные (проектные) параметры модели $X \in p$, при которых выполняются ограничения на структурные параметры $F(p) \geq 0$ и ограничения на отклики модели - переменные состояния: $\Phi(q) \geq 0$, обеспечивающие минимум целевой функции $Z(p) \rightarrow \min$. В качестве целевой функции $Z(p)$ выбирается масса конструкции.

Структурные параметры модели p являются разнородными. Конструктивные оптимизируемые параметры могут иметь как качественную, так и количественную шкалу. Количественную шкалу имеют такие параметры как количество спиральных или кольцевых ребер, угол наклона ребра к образующей и геометрические параметры сечения реберной структуры. К параметрам с качественной шкалой можно отнести вариант соединения ребер в структуре, выбор материала исполнения, отсутствие или наличие конструктивных элементов и другие задачи.

Решение задачи оптимального проектирования может быть основано на анализе силовых схем и типовых решений или на методах топологической и параметрической оптимизации. Выбор способа решения обуславливается особенностями и видом конструкций. Очевидно, что

применение анализа силовых схем и типовых решений требует от проектировщика большого опыта и теоретических знаний. При этом следует учесть, что множество рассматриваемых решений является ограниченным. Таким образом, результат такого анализа зависит от большого количества факторов. Тем не менее, для задач оптимизации параметров с качественной шкалой анализ силовых схем является единственным вариантом использования.

Методы топологической и параметрической оптимизации так же имеют ограничения по применимости в зависимости о количества ограничений, варьируемых параметров и структуры области ограничений. Кроме того, топологическая оптимизация определяет структуру конструкции и поэтому не может быть применима к конструкциям с определенной жесткой структурой. Применительно к строительным конструкциям следует также отметить, что использование нелинейного программирования [7] встречается редко, поскольку требует от инженеров глубоких знаний теории оптимизации.

В силу разнородности параметров для оптимального проектирования могут применяться как методы, основанные на анализе силовых схем, так и численные методы, основанные на алгоритмах оптимизации.

В настоящее время достаточно проработаны и известны методы оптимального проектирования сетчатых конструкций регулярной реберной структуры при условии отсутствия обшивки [1, 8, 9]. При проектировании сложных машиностроительных и строительных конструкций, имеющих конструктивные и технологические вырезы, усиления или обшивку, использование таких методов затруднено. Одной из причин этого является использование в данных методах континуального подхода [10], которое не дает достаточной точности для нерегулярных структур.

3. Моделирование напряженно деформированного состояния сетчатых конструкций

Математическая модель [11] деформирования анизотридной сетчатой конструкции основывается на идее совместного деформирования реберной структуры и обшивки, при ее наличии. Для этого использовались следующие кинематические гипотезы.

1. Деформирование обшивки соответствует классической гипотезе Кирхгофа-Лява, согласно которой материальная нормаль совпадает с геометрической, не искривляется и не изменяет своей длины, т.е. деформации нормали и поперечные сдвиги отсутствуют [12].

2. Каждое ребро представляется в виде набора коротких балок, при этом балки имеют высоту сечения, соизмеримую с длиной балки. Деформирование балки соответствует гипотезе Тимошенко: поперечные сечения балки не изменяют формы и размеров, но не остаются перпендикулярными к изогнутой оси балки [13].

3. Перемещения точек балок разных семейств (спиральных, кольцевых) в местах их пересечения непрерывны и одинаковы.

4. Перемещения ребер и обшивки совпадают на линиях поверхности их контакта, проходящих параллельно осям ребер.

Для представления совместного деформирования обшивки и реберной структуры рассмотрим взаимное расположение геометрической нормали к поверхности приведения и материальных нормалей для обшивки и реберной структуры.

На рисунке 2 представлена схема совместного деформирования обшивки и реберной структуры. Материальная нормаль в обшивке совпадает с геометрической; при деформации она поворачивается из исходного положения на угол $\tilde{\theta}$. В ребре материальная нормаль поворачивается в пространстве на угол θ , причем угол γ между геометрической и материальной нормалью равен деформации поперечного сдвига.

Кинематическая гипотеза для балки не учитывает деформацию сечения. Поэтому при равенстве перемещения ребра и балки на поверхности контакта следовало бы положить поворот сечения балки относительно её продольной оси равным нулю. Это не представляется допустимым ввиду того, что высота сечения превышает ширину в 10 раз и более. Таким образом, более слабое условие равенства перемещений на линии контакта можно считать допущением «в

запас» по жесткости и более рациональным для описания кинематики, чем допущение о совпадении перемещений на всей поверхности контакта, приводящее к завышению жесткости.

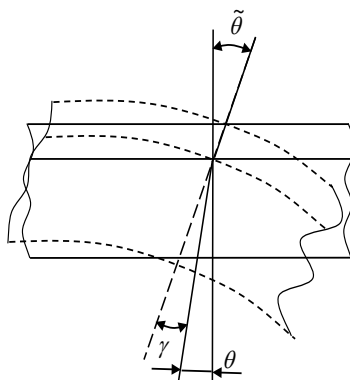


Рисунок 2. Совместное деформирование обшивки и реберной структуры: - - - - геометрическая нормаль, ——— материальная нормаль; $\tilde{\theta}$ - угол поворота геометрической нормали к обшивке, θ - угол поворота материальной нормали к ребрам, γ - угол сдвига.

Введём вспомогательную цилиндрическую систему координат (z, φ, r) , где ось z совпадает с осью оболочки, угол φ отсчитывается от произвольно выбранной образующей, ось r направлена по внешней нормали к поверхности приведения. Зададим поверхность приведения в цилиндрической системе координат в виде: $r=r(z)$. Определение нормальной координаты произвольной точки (z, r) позволяет рассматривать перемещения как функцию осевой, нормальной и окружной координат.

Таким образом, поле перемещений сетчатой конструкции с обшивкой однозначно определяется восьмью функциями двух координат z и φ :

- тремя функциями линейных перемещений поверхности приведения $u_s(z, \varphi), u_t(z, \varphi), u_n(z, \varphi)$;
- тремя углами поворота сечения балок в реберной структуре $\theta_s(z, \varphi), \theta_t(z, \varphi), \theta_n(z, \varphi)$;
- двумя углами поворота геометрической нормали к обшивке $\tilde{\theta}_s(z, \varphi), \tilde{\theta}_t(z, \varphi)$.

При рассмотрении частого случая (оболочки без обшивки) введенные выше углы поворота геометрической нормали к обшивке $\tilde{\theta}_s(z, \varphi), \tilde{\theta}_t(z, \varphi)$ будут отсутствовать. Таким образом, модель деформирования реберной структуры будет включать шесть функций двух координат z и φ :

- три функции линейных перемещений поверхности приведения $u_s(z, \varphi), u_t(z, \varphi), u_n(z, \varphi)$;
- три угла поворота сечения балок в реберной структуре $\theta_s(z, \varphi), \theta_t(z, \varphi), \theta_n(z, \varphi)$.

Таким образом, построены базисные функции, обеспечивающие совместность перемещений ребер и обшивки в узлах на поверхности приведения. Построенная модель обладает следующими свойствами:

- 1) перемещения ребер и обшивки совпадают на линиях поверхности приведения, проходящих параллельно осям ребер (линиях приведения для ребер);
- 2) деформирование обшивки соответствует классической гипотезе Кирхгофа-Лява;
- 3) каждое ребро представляется в виде набора коротких балок, для которых принята гипотеза Тимошенко;
- 4) перемещения спиральных и кольцевых ребер в местах их пересечения непрерывны;
- 5) напряжения, действующие вдоль нормали к поверхности приведения, равны нулю.

Для построения дискретной модели сетчатой оболочки каждый конструктивный элемент задается соответствующим набором конечных элементов. При построении конечно-элементной модели конструкции для дискретизации обшивки использовался двумерный трехузловой конечный элемент (рисунок 3) в виде пластины Зенкевича-Аргириса. Перемещения в обшивке аппроксимируются неполным кубическим многочленом (элемент

Зенкевича-Аргириса). Для дискретизации балки используется одномерный двухузловой конечный элемент (рисунок 4) – балка Тимошенко, перемещения аппроксимируются одномерным эрмитовым многочленом 3-го порядка.

Расчет напряженно-деформированного состояния анизогридной сетчатой оболочечной конструкции выполняется методом конечных элементов в вариационной постановке по принципу Лагранжа.

Для каждого типа конечного элемента выбирается местная система координат (s, t, n) , начало которой находится в точке проекции центра элемента на поверхность приведения. Варьируемыми переменными являются узловые значения функций, определяющих перемещения, на поверхности приведения.

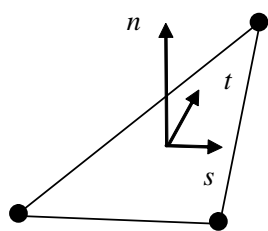


Рисунок 3. Двумерный трехузловой конечный элемент.

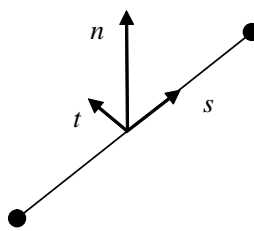


Рисунок 4. Одномерный двухузловой конечный элемент.

Таким образом, дискретная модель статического деформирования сетчатой оболочки регулярной и нерегулярной структуры позволяет обеспечить совместность деформирования элементов обшивки и ребер на их линиях приведения. Как частный случай, модель описывает статическое деформирование сетчатой конструкции без обшивки.

При дискретизации модели сетчатой конструкции без обшивки используются только одномерные двухузловые конечные элементы. В вариационной постановке метода конечных элементов жесткостные параметры балки (поперечное сечение балки) учитываются в матрице упругости:

$$D = \begin{bmatrix} EF & ES_t & ES_n & 0 \\ ES_t & EI_t & EI_m & 0 \\ ES_n & EI_m & EI_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & GI_{кр} \end{bmatrix} \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала, G – модуль сдвига материала, S_t , S_n – статические моменты, I_t , I_n , I_m , моменты инерции, $I_{кр}$ – крутильная жесткость, F – площадь поперечного сечения.

4. Алгоритм решения и инструмент численного расчета

На рисунке 5 представлен алгоритм решения задачи оптимизации на основе анализа силовых схем. Важно чтобы рассматриваемые варианты расчетных моделей были адекватны реальным конструкциям. Для этого требуется учитывать множество параметров, в том числе и граничные условия [14]. Пакеты программ с открытым кодом могут дать возможность вариации задания различных условий и параметров моделирования. Такой САД-системой является пакет программ «Композит НК Анизогрид» [15], разработанный в Новокузнецком институте (филиале) Кемеровского государственного университета.

Данный пакет программ имеет открытый код, что позволяет инженерам и конструкторам вносить изменения в алгоритм расчета. Пакет программ представляет собой инструментарий для конструирования прикладных программ с использованием технологии визуального программирования, где алгоритм расчета представлен как последовательность вычислений

значения функциональных объектов. При этом в качестве аргументов данных объектов выступают другие функциональные объекты. Каждый функциональный объект реализует конкретную подпрограмму.

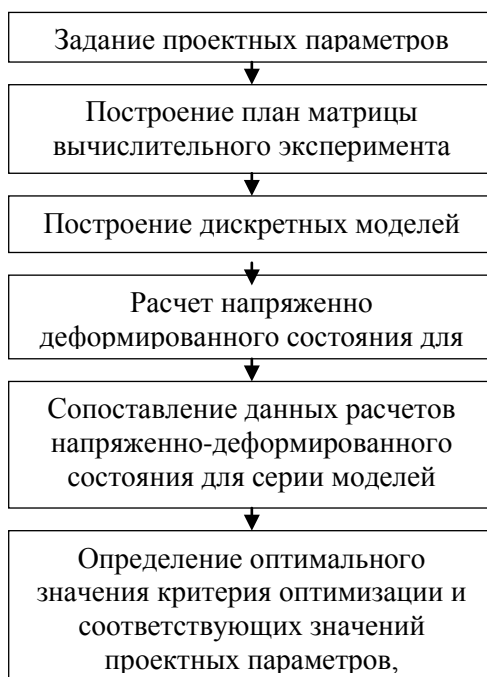


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма решения задачи оптимизации конструкции на основе анализа силовых схем.

Пакет программ Композит НК Анизогрид, как и многие другие CAD-системы, основан на использовании метода конечных элементов. При этом для моделирования конструкций применяется модель совместного деформирования реберной структуры и обшивки [11]. Для удобства решения задач анализа и синтеза для конструкций сложной геометрии в пакете программ встроены модули автоматизации вычислительного эксперимента, позволяющие рассчитать аппроксимационные функции.

В состав пакета программ «Композит-НК Анизогрид» включен модуль для автоматизированного построения аппроксимационных функций откликов по результатам вычислительных экспериментов. В качестве исходных данных выступают: текстовый файл, содержащий план-матрицу вычислительного эксперимента, и файлы с откликами. Построение функции аппроксимации предусматривает выполнение серии шагов:

- загрузки план-матрицы и откликов факторного эксперимента;
- проверка полноты загрузки входных данных для построения аппроксимирующих функций;
- определение необходимого вида базисных функций и формирование набора базисных функций для функций откликов;
- расчет коэффициентов аппроксимирующей функции.

Данный пакет широко применяется для вычислительного эксперимента при проектировании сетчатых конструкций авиакосмического назначения [16] и апробирован на расчёте напряженно-деформированного состояния и устойчивости сетчатых анизотридных конструкциях. При этом сопоставления проводились как в сравнении с аналитическими расчетами, так и с известными CAD-системами. В настоящее время пакет программ используется при моделировании и проектировании сетчатых анизотридных конструкций АО «Центральный Научно-исследовательский институт специального машиностроения» (г. Хотьково, Московская обл.).

5. Решение задачи оптимального проектирования

Выбор варианта реберной структуры также можно отнести к задаче с параметрами, имеющими качественную дискретную шкалу измерений. В работах Васильева, Никитина, Разина [17] показано, что на практике используются две основные формы взаимного расположения ребер, которые являются более рациональными в технологическом отношении, чем треугольная ячейка (рисунок 6). В случае однородного напряженного состояния изделия применение континуального моделирования к таким конструкциям дает эквивалентные результаты для всех рассматриваемых форм ячеек, за счет осреднения сетчатой структуры.

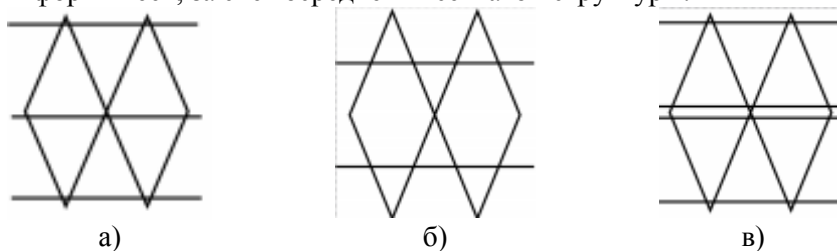


Рисунок 6. Формы взаимного расположения ребер: а) треугольная ячейка; б) кольцевые ребра проходят между пересечениями спиральных ребер; в) двойные кольцевые ребра проходят вблизи перекрестий спиральных ребер.

При нарушении регулярности реберной структуры, наличии усилений, при локальном нагружении конструкции в её элементах возникают напряжения, значительно изменяющиеся в рамках треугольной ячейки. Для получения результатов согласующихся с результатами натуральных экспериментов в таких случаях используют дискретное моделирование на основе метода конечных элементов. При этом выбор задания вида пересечения спиральных и кольцевых ребер, вида поперечного сечения кольцевых ребер может оказать влияние на результаты численных расчётов.

Рассмотрим задачу определения оптимальной структуры ячейки на основе дискретной модели. Данную задачу можно представить как двухфакторную – одним фактором будет являться расположение кольцевого ребра относительно высоты ячейки, а вторым вариант выполнения кольцевого ребра (одинарный или двойной).

Моделирование кольцевого ребра позволяет учитывать вариант выполнения при задании вида поперечного сечения. На рисунках 7 и 8 представлены поперечные сечения ребер.

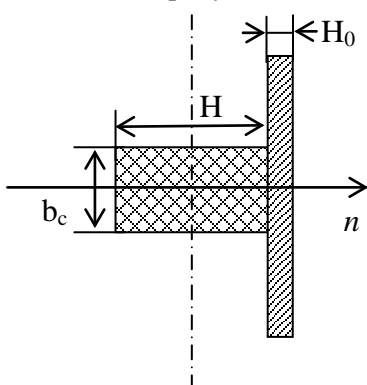


Рисунок 7. Поперечное сечение одинарного ребра.

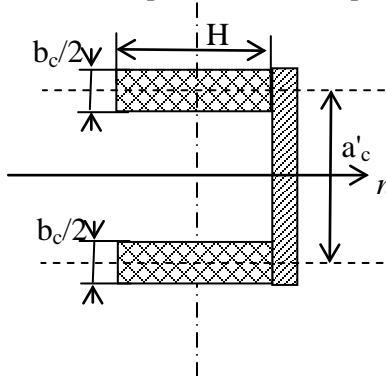


Рисунок 8. Поперечное сечение двойного ребра.

В качестве расчетной модели для проведения вычислительного эксперимента рассматривалась цилиндрическая сетчатая конструкция без обшивки. На рисунке 9 приведены дискретные модели конструкции при варьировании факторов.

Верхнюю кромку конструкций нагружали через жесткий узел, расположенный в плоскости верхнего сечения, сжимающей силой 1000 кгс с моментом 1000 кгс.

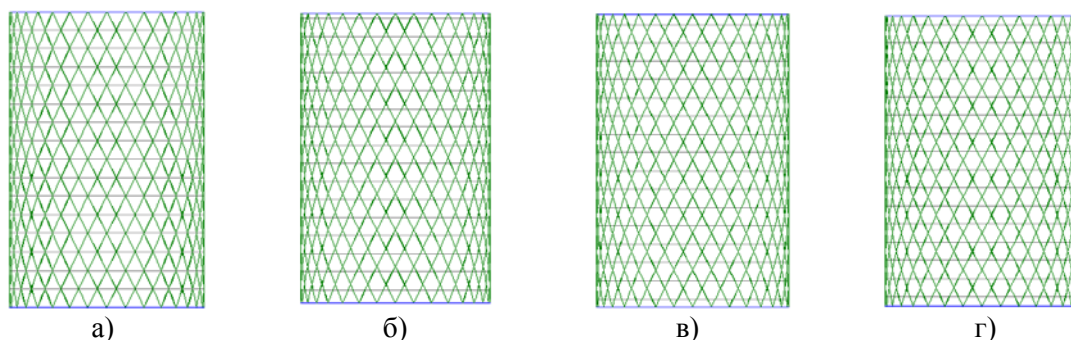


Рисунок 9. Дискретные модели при варьировании факторов: а) треугольная ячейка; б) кольцевое ребро расположено на 30% высоты ячейки; в) кольцевое ребро на 50% высоты ячейки; г) кольцевое ребро расположено на 60% высоты ячейки.

Проводился анализ значений расчетных напряжения в спиральных ребрах конструкций между узлами пересечения ребер.

За базовую модель была выбрана конструкция с поперечным сечением кольцевых ребер в виде одинарного ребра (рисунок 7), кольцевые ребра проходят через точки пересечения двух семейств спиральных ребер и образуют треугольные ячейки (рисунок 9,а).

Вычисленные численно значения напряжений спиральных ребер расчетных моделей, полученных при варьировании выбранных в факторов, относились к напряжениям базовой модели.

Сравнительный анализ показывает, что различия между осевыми напряжениями в спиральных ребрах конструкции при различных значениях варьируемых параметров достигают 1-3%, а в касательных напряжениях – до 19-30%.

Определение оптимального варианта при достижении минимальных значений нормальных и касательных напряжений соответствует выводам, приведенным в работе [17]. Изгиб ребер в структуре, изображенной на рисунке 6в больше, чем в структуре с треугольными ячейками (рисунок 6а). Анализ продольных напряжений показал, что при наличии сосредоточенных нагрузок структура, показанная на рисунке 6в, является более эффективной, чем структура, представленная на рисунках 6б и 6г.

6. Выводы

В работе показаны подход к построению математической модели совместного деформирования сетчатой структуры, образованной двумя семействами ребер, и обшивки; подход к построению дискретной модели сетчатой конструкции, учитывающей задание вида поперечного сечения ребер сетчатой структуры и взаимного расположения ребер.

Данные подходы применены к проведению анализа силовых конструкций при определении оптимального вида сетчатой структуры. Результаты численного моделирования и анализа показывают, что оптимальной является сетчатая структура, представленная на рисунке 6в.

Для дальнейшего анализа можно применить параметрические методы оптимизации [18] для решения задачи с количественной шкалой для определения более оптимальных параметров сечения ребра [19-20].

7. Литература

- [1] Васильев, В.В. Анизотридные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложения к космической технике / В.В. Васильев, Б.А. Барынин, А.Ф. Разин, В.И. Халиманович // Композиты и Наноструктуры. – 2009. – № 3. – С. 38-50.
- [2] Васильев, В.В. Теория сетчатых и подкрепленных композитных оболочек / В.В. Васильев, А.В. Лопатин // Механика конструкций из композиционных материалов. – 1984. – С. 31-36.

- [3] Желева-Мартинс, Д.И. Универсальные конструкции В.Г. Шухова в предметном индустриальном дизайне / Д.И. Желева-Мартинс, С.Б. Ташева // Дизайн. Искусство. Промышленность. – 2014. – № 2. – С. 10-20.
- [4] Чаускин, А.Ю. Расчет и конструирование башенных сооружений комбинированного типа / А.Ю. Чаускин, А.В. Старов, Г.М. Карасев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – Т. 32, № 51. – С. 49-54.
- [5] Васильев, В.В. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций / В.В. Васильев, А.Ф. Разин // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2006. – Т. 1-2, № 142-143. – С. 3-6.
- [6]. Казначеева, О.К. Идентификация параметров упругости и жесткости конструкций из армированных материалов / О.К. Казначеева, В.О. Каледин. – Новочеркасск: ЛИК, 2012. – 135 с.
- [7] Василькин, А.А. Интеграция инструментов структурной и параметрической оптимизации на этапе поискового проектирования стальных конструкций / А.А. Василькин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2018. – Т. 1, № 49. – С. 22-28.
- [8] Bunakov, V.A. Design of Axially Compressed Composite Cylindrical Shells with Lattice Stiffeners / Optimal Structural Design // Technomic. – 1999. – P. 207-246.
- [9] Васильев, В.В. О влиянии углов ориентации спиральных ребер на перемещения канонической и цилиндрической сетчатых оболочек // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2012. – Т. 1-2, № 164-165. – С. 3-7.
- [10] Бурнышева, Т.В. Сравнение дискретного и континуального подхода к расчету напряженного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом нагружении / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин // Науч.-технич. вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 113-116.
- [11] Бурнышева, Т.В. Математическая модель совместного деформирования элементов анизотридных конструкций космических летательных аппаратов / Т.В. Бурнышева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 94-97.
- [12] Амбарцумян, С.А. Теория анизотридных пластин: Прочность, устойчивость и колебания / С.А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1987. – 360 с.
- [13] Тимошенко, С.П. Механика материалов / С.П. Тимошенко, Дж. Гере. – СПб.: Издательство "Лань", 2002. – 672 с.
- [14] Бурнышева, Т.В. Особенности задания граничных условий при моделировании сетчатых анизотридных конструкций / Т.В. Бурнышева, О.А. Штейнбрехер, А.Д. Ульянов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: математическое моделирование и программирование. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 137-144. DOI: 10.14529/mmp180112.
- [15] Каледин, В.О. Программная система для алгоритмизации численного решения задач механики сплошной среды / В.О. Каледин, Я.С. Крюкова, Н.В. Нагайцева, Е.В. Равковская // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – Т. 1-1, № 81. – С. 161-164.
- [16] Бурнышева, Т.В. Применение методологии вычислительного эксперимента в задачах проектирования и диагностики анизотридных конструкций космических летательных аппаратов / Т.В. Бурнышева // Науч.-технич. вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 98-102.
- [17] Васильев, В.В. Исследование влияния формы ячейки на напряженное состояние композитной сетчатой конструкции при локальном нагружении // В.В. Васильев, М.В. Никитин, А.Ф. Разин // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2008. – Т. 1-2, № 138-139. – С. 78-81.
- [18] Каледин, В.О. Алгоритм оптимизации многоэлементных конструкций с ограничениями по прочности и габаритам / В.О. Каледин, О.А. Штейнбрехер // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 113-115.

- [19] Штейнбрехер, О.А. Решение задачи параметрической оптимизации сетчатой цилиндрической конструкции / О.А. Штейнбрехер, Т.В. Бурнышева // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 10. – С. 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1688.
- [20] Каледин, В.О. Применение математического моделирования в проектировании анизотридных сетчатых силовых конструкций нерегулярной структуры / В.О. Каледин, Т.В. Бурнышева, О.А. Штейнбрехер // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). – Самара: Новая техника, 2017. – С. 1051-1058.

Application of mathematical modelling to solve problems of optimization of lattice structures

T.V. Burnysheva¹, O.A. Shteinbreher¹

¹The Novokuznetsk branch of the Kemerovo State University, Tsiolkovsky str. 23, Novokuznetsk, Russia, 654041

Abstract. The paper deals with the application of mathematical modeling for solution of problems of optimum design of mesh structures. We will consider the method of analysis of power circuits for solving problems of structural optimization of such structures. A system for automating a computational experiment, modeling, and numerical calculation is proposed in the paper. The authors consider a mathematical model of joint deformation of the rib structure and skin, presented algorithms for solving the problem of optimal design. The problem of choosing the optimal variant of the arrangement of annular ribs in a cylindrical structure is considered as an example