



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

N1, TOM 15 (2009) 47-57

УДК 692.44/47

(09)-0182-1

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ ПРОСТОРОВО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.Ю. Алпатов, И.С. Холопов

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. Молодогвардейская 194, 443001, м. Самара, Россия.*

E-mail: vadim@mail.ru

Отримана 12 жовтня 2008; прийнята 23 січня 2009

Анотація. Приведений аналіз існуючих конструктивних вирішень каркасів, що несуть, у вигляді просторових стержневих конструкцій. Проведена оцінка існуючих способів об'єднання стержневих елементів у вузлах гратчастих просторово-стержневих конструкцій. Встановлено, що одним з найбільш істотних недоліків таких конструкцій є підвищена матеріаломісткість. Розглянуті питання загальної постановки завдання оптимального проектування просторових стержневих конструкцій. Для конструкцій покриття будівель і споруд сформульовано однокритерійна задача пошуку оптимальної геометричної форми з безліччю обмежень. Як критерій якості прийнятий мінімум об'єму (маси) матеріалу. У математичній моделі задачі прийняті умови "не звиродніння" елементів і незмінності топології конструкції. Надані пропозиції про послідовну багатогорінову декомпозицію задачі оптимального проектування просторово-стержневих металевих конструкцій. Представлено рішення задачі оптимізації геометричної форми просторово-стержневої конструкції покриття на прямокутному плані.

Ключові слова: просторові гратчасті конструкції, просторово-стержневі конструкції, оптимізація форми, оптимальне проектування.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.Ю. Алпатов, И.С. Холопов

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. Малогвардейская 194, 443001, г. Самара, Россия.*

E-mail: vadim@mail.ru

Получена 12 октября 2008; принята 23 января 2009

Аннотация. Приведен анализ существующих конструктивных решений несущих каркасов в виде пространственных стержневых конструкций. Проведена оценка существующих способов объединения стержневых элементов в узлах решетчатых пространственно-стержневых конструкций. Установлено, что одним из наиболее существенных недостатков таких конструкций является повышенная материалоемкость. Рассмотрены вопросы общей постановки задачи оптимального проектирования пространственных стержневых конструкций. Для конструкций покрытия зданий и сооружений сформулирована однокритериальная задача поиска оптимальной геометрической формы со множеством ограничений. В качестве критерия качества принят минимум объема (массы) материала. В математической модели задачи приняты условия "не вырождения" элементов и неизменности топологии конструкции. Даны предложения о последовательной многоуровневой декомпозиции задачи оптимального проектирования пространственно-стержневых металлических конструкций. Представлено решение задачи оптимизации геометрической формы пространственно-стержневой конструкции покрытия на прямоугольном плане.

Ключевые слова: пространственные решетчатые конструкции, пространственно-стержневые конструкции, оптимизация формы, оптимальное проектирование.

GEOMETRICAL FORM OPTIMIZATION OF A SPATIALLY-ROD STRUCTURES

Vadim Yu. Alpatov, Igor S. Kholopov

Samara State University of Architecture and Civil Engineering

Molodogvardeyskaya str., 194, 443001, Samara, Russia

E-mail: vadim@mail.ru

Received 12 October 2008; accepted 23 January 2009

Abstract. There is given an analysis of the existing design concepts of bearing frameworks in the form of spatial rod structures. The existing ways of joining rod elements in the nodes of lattice spatially rod structures are estimated. It has been found out that one of the most substantial lacks of such structures is larger materials consumption. There are considered the issues of a general formulation of the problem of an optimum design of spatial rod structures. A one-criteria task of searching an optimum geometrical form with a number of restrictions is formulated for designing building and structure coverings. A minimum material volume (mass) was taken as a criterion of quality. In the mathematical model of the task there are accepted the requirements of the elements "non-degeneracy" and topology constancy. There is suggested a successive pyramided decomposition of the task of an optimum design of spatially-rod metal structures. On the right-angular design there is given a solution of the task of optimization of a geometrical form of a spatially-rod coverage structure.

Keywords: spatial lattice designs, spatially-rod, optimization of the form, optimum designing.

Пространственные решетчатые конструкции обладают значительной способностью к формообразованию. К таким конструкциям применимы практически все известные приемы формообразования — это и симметрия, и отображение, и повторение вдоль образующей, и копирование с поворотом, и т.д. Указанные приемы применимы к типовому элементу таких конструкций, в качестве которого могут выступать отдельные элементы или отдельные ячейки, группы элементов или группы ячеек, крупноразмерные элементы (плоские или пространственные фермы и др.). Традиционно наиболее известные представители этого класса конструкций — структурные плиты [1], [2], [3]. Однако существуют множественные примеры реализации подобных конструкций с более сложной формой, например, в виде шара (рис. 1), сетчатых оболочек двоякой кривизны конструкции (рис. 2), двухсетчатой цилиндрической или параболической оболочки [4], (рис. 3), ступенчатой плиты [1], (рис. 4.), пирамиды (рис. 5) и прочее.

Сложность объединения большого количества элементов в одном узле является известным недостатком пространственно-стержневых конструкций. Во многом из-за этого практическая реализация пространственно-стержневых конструкций сложной геометрической формы в значительной мере отстает от разнообразия при их моделировании различными приемами формообразования. Как правило, соединение элементов в таких конструкциях выполняется индивидуально разработанным узлом для конкретного типа геометрии конструкции и определенного количества соединяемых элементов. Единого универсального узлового соединения для всех видов пространственно-стержневых конструкций нет. К наиболее универсальным узловым соединениям (коннекторам), используемым для получения конструкций с различной геометрией, следует отнести "Меро", "МАрхИ", "Кисловодск", "Октаплат", "На ежах", "На ванной сварке". Однако и эти коннекторы имеют значительное ограничение в

применимости. Они используются лишь при поэлементной сборке пространственных конструкций, а, как известно, такого типа конструкции могут собираться еще и крупноразмерными элементами.

Большое количество элементов, объединяемых в узле, есть следствие особенностей самих пространственно-стержневых конструкций. Это имеет свои положительные и отрицательные стороны. К положительным моментам следует отнести большую "живучесть", повышен-

ную надежность пространственных конструкций в сравнении с традиционными плоскими, архитектурную выразительность, возможность крепления подвесного оборудования, возможность выполнения беспрогонного покрытия. "Живучесть" и повышенную надежность таким конструкциям придает их многократная статическая неопределимость, то есть большое количество "лишних" элементов. Одновременно эти "лишние" элементы являются причиной отрицательных качеств пространственных

а)



б)



Рис. 1. Структурные конструкции в форме шара: а — Музей С.Дали в г. Фигерас (Испания); б — Порт в г. Барселона (Испания).



Рис. 2. Сетчатые оболочки двоякой кривизны конструкции В. Г. Шухова на Выксунском металлургическом заводе, 1987 г.

решетчатых конструкций таких как, например, сложность узлового соединения, увеличение трудоемкости сборки и монтажа конструкции, повышенный расход материала вследствие большей массы в сравнении с плоскими конструкциями. Наиболее важным и относительно легко формализуемым недостатком таких конструкций является повышенный расход материала (масса). Масса как объективный критерий сравнения экономичности принятых проектных решений конструкций удобен еще и тем, что входит как составляющая практически в любой другой критерий (например, стоимость, трудоемкость и прочее). Повышенный расход материала в пространственных конструкциях вызван не только наличием "лишних" элементов, но и сложностью, массивностью узлового соединения. Снижение материалоемкости пространственных конструкций — задача, безусловно, актуальная.

Добиться получения конкурентоспособных вариантов пространственно-стержневых конструкций можно лишь применяя при их разработке элементы и методы оптимизации. Для получения наилучшего результата оптимизация при проектировании такого рода конструкций должна присутствовать на каждом этапе разработки проекта: при разработке отдельного узла; при проектировании отдельного элемента; при проектировании конструкции в целом; при поиске геометрической формы конструкции. Известно, что наибольшего снижения массы любой конструкции можно добиться путем поиска ее оптимальной формы (геометрии) [5].

Сложность постановки задачи оптимального проектирования пространственно-стержневых конструкций в наиболее общем виде заключается в трудностях учета их особенностей, охарактеризованных нами ранее как их досто-

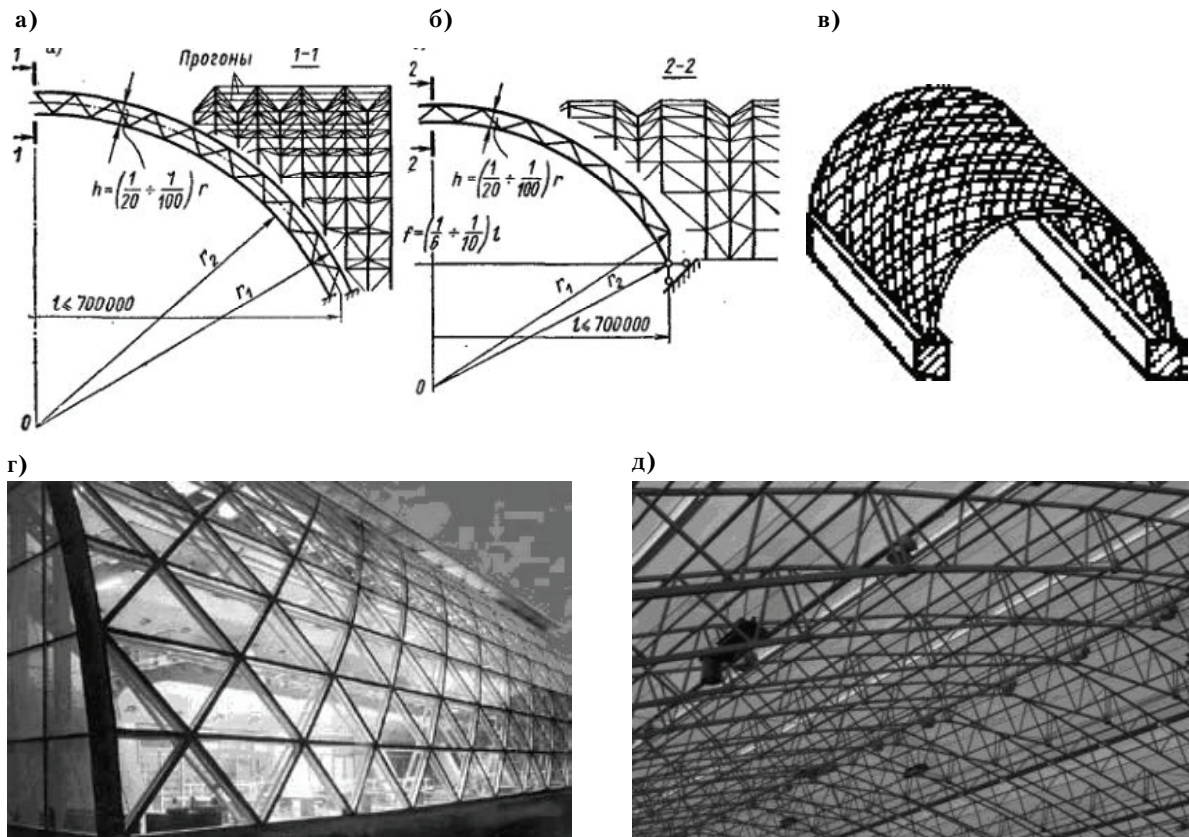


Рис. 3. Двухсетчатые решетчатые оболочки: а — регулярная складчатая; б — призматическая; в — сомкнутый свод-оболочка; г — здание факультета права в Кембридже (Великобритания); д — параболическая оболочка.

инства-недостатки и не только. Сложность постановки задачи можно разбить по группам, связанных с:

- многообразием возможных геометрических форм конструкций;
- многообразием возможной топологии (схема объединения элементов) конструкции;
- множеством возможных способов опирания;
- множеством возможных схем загрузки;
- возможностью применения множества расчетных схем (с учетом жесткости узлов и без);
- множеством возможных механических и физических свойств материалов элементов;
- возможностью или невозможностью допущения о вырождении "лишних" связей;

- ограниченной возможностью выполнения узловых соединений для сложного примыкания к узлу множества элементов;
- прочими сложностями.

Практическим выходом для решения столь сложной задачи оптимального проектирования пространственно-стержневых конструкций может стать разбиение ее на ряд более мелких задач, то есть декомпозиция исходной задачи. Декомпозиция может быть многоуровневой, использующей метод индукции, то есть разбиение, выполняемое от общего к частному. На первом уровне разумно разделить пространственные решетчатые конструкции на группы по назначению — покрытия, перекрытия, стеновые каркасы, каркасы, выполняющие множественные

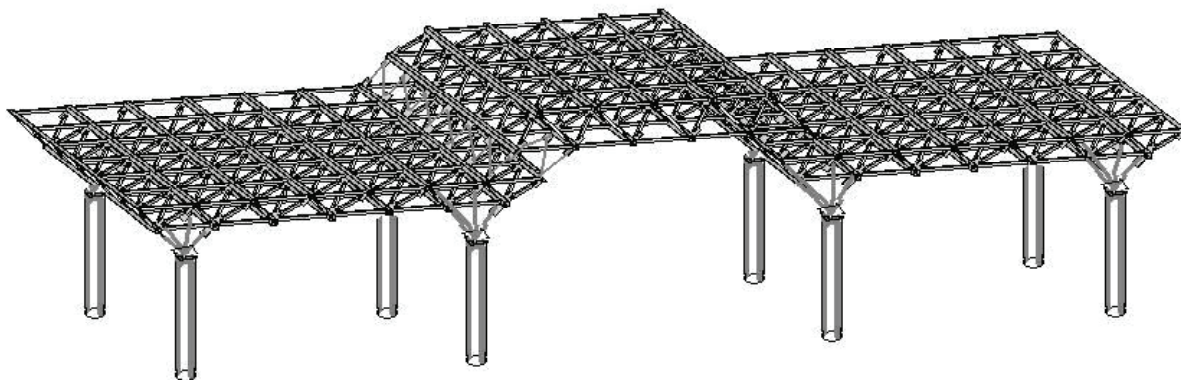


Рис. 4. Ступенчатая структурная плита.



Рис. 5. Структурная конструкция в форме пирамиды в г.Тольятти.

функции. Для каждой категории полученных задач выполнить декомпозицию второго уровня, например, все пространственно-стержневые покрытия разделить по характеру перекрываемого контура (прямоугольный план, круглый, многогранный, треугольный и т.д.). Следующий уровень декомпозиции заключается в разбиении полученных задач по признаку — топология конструкций. Следующий уровень разбиения по признаку — принцип формообразования. Следующий уровень разбиения по признаку — распределение материала по элементам конструкции. Следующий уровень разбиения по признаку — способ сборки конструкции (поэлементно, крупноразмерными элементами). Следующий уровень разбиения по признаку — тип узлового соединения. Последний уровень декомпозиции может отсутствовать, а в решение общей задачи в этом случае указанный признак может войти как ограничение. При таком подходе на всех этапах, влияющих на возможность применения того или иного вида узлового соединения, должна выполняться проверка применимости выбранного узла. Учет этого признака как ограничения позволит отсеять получаемые при проектировании, но невозможные для реализации на

практике варианты конструкций. Однако это еще приведет и к существенному ограничению поиска оптимальных конструкций в рамках лишь тех известных типов узловых соединений, которые будут введены в задачу, что не позволит применить данный алгоритм для конструкций с новыми видами узловых соединений.

Задача оптимизации геометрической формы пространственно-стержневых конструкций покрытий на квадратном или прямоугольном плане была решена авторами для некоторых известных типов топологии конструкций [6]. Всего в рассмотрение вводилось шесть типов топологии, схема которых представлена на примере структурных плит (см. рис. 6). Задача формулировалась как многопараметрическая задача условной оптимизации.

За неизменяемыми параметры принимались:

- 1) габаритные размеры поясных сеток структурной конструкции (Lx^e, Ly^e, Lx^h, Ly^h);
- 2) тип топологии структурной конструкции (*tip*);
- 3) материал стержней конструкции (R_i^e — расчетное сопротивление *i*-го стержня, γ_i — объемный вес *i*-го стержня);

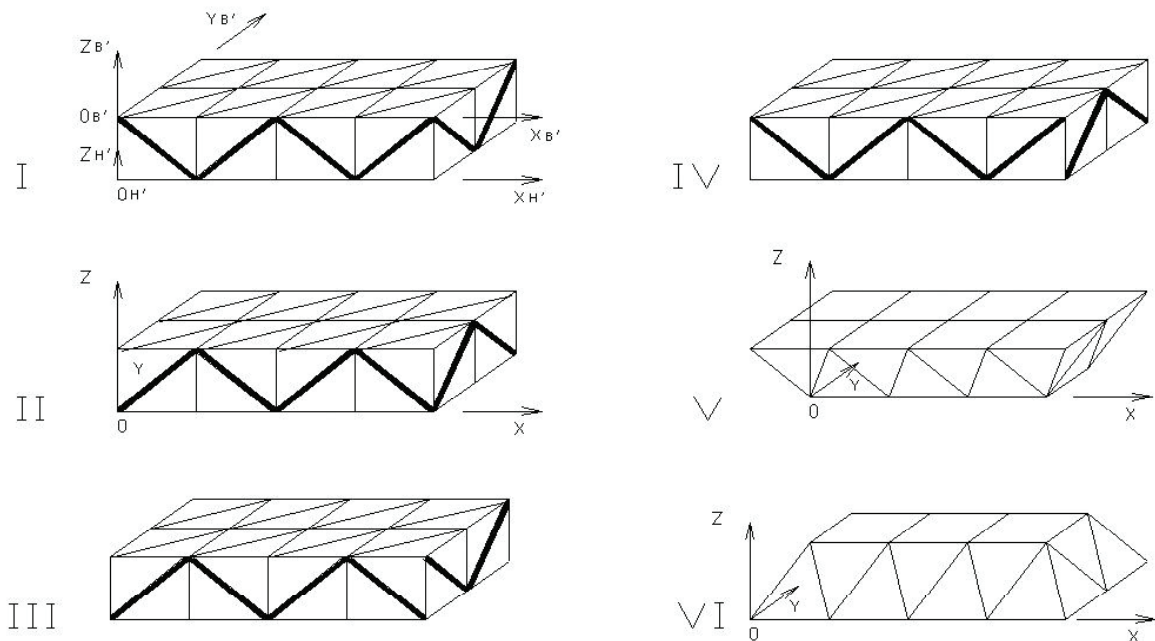


Рис. 6. Шесть типов топологии структурных конструкций.

За параметры управления принимались:

- 1) высота на опоре (h);
- 2) количество узлов поясных сеток в двух взаимоперпендикулярных направлениях для верхней и для нижней поясных сеток (nx^g, ny^g, nx^n, ny^n);
- 3) величины стрел подъема для поясных сеток в двух взаимоперпендикулярных направлениях для верхней и для нижней поясных сеток (fx^g, fy^g, fx^n, fy^n);
- 4) тип поперечного сечения стержней.

За параметры состояния принимались:

- 1) кинематически допустимые перемещения (z_j), где $j \in (1, 2, \dots, m)$, m — количество неизвестных перемещений;
 - 2) внутренние усилия в стержнях (N_i), где $i \in (1, 2, \dots, k)$, k — количество узлов в конструкции;
 - 3) площади поперечных сечений стержней (F_i).
- В рассмотрение вводились следующие ограничения.

1. Физические ограничения:

- а) прочности растянутых стержней;
- б) устойчивости сжатых стержней.

$$\frac{N_i}{F_i} \leq \sigma_\alpha, \tag{1}$$

где $\alpha = \text{sign} \cdot R_{y_i}$, то есть сигнум-функция расчетного сопротивления материала i -го стержня конструкции; σ_+ — для растянутых стержней; σ_- — для сжатых стержней.

Если материал для всех стержней конструкции одинаковый, то $R_{y_i} = R_y$; $\sigma_+ = R_y$; $\sigma_- = \varphi \times R_y$, — где φ коэффициент продольного изгиба.

Ограничение (1) по прочности (если σ_+) является неизменяемым ограничением. Ограничение (1) по устойчивости (если σ_-) — плавающее ограничение, которое изменяется вместе с изменением коэффициента продольного изгиба.

2. Геометрические ограничения — условия совместности деформаций. В форме метода перемещений они имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} R_{11} \times \bar{z}_1 + \dots + R_{1m} \times \bar{z}_m &= -\bar{P}_{1m} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ R_{n1} \times \bar{z}_1 + \dots + R_{nm} \times \bar{z}_m &= -\bar{P}_{nm} \end{aligned} \right\}, \tag{2}$$

где R_{nm} — коэффициенты матрицы жесткости; \bar{z}_m — единичные перемещения узла m ; \bar{P}_{nm} — грузовые члены метода перемещений; n — число элементов; m — число неизвестных перемещений.

3. Ограничения жёсткости.

Этот вид ограничений можно свести к ограничению максимального прогиба характерного узла конструкции:

$$f_{xap} \leq [f], \tag{3}$$

где f_{xap} — перемещение характерного узла, $[f]$ — предельно допустимый нормами прогиб конструкции.

4. Конструктивные ограничения и ограничения на пределы изменения геометрических параметров конструкции.

- а) Ограничение на минимальное количество узлов в поясных сетках структуры в направлениях ширины и длины конструкции:

$$\left. \begin{aligned} n_x^g &\geq [n_x^g] & n_y^g &\geq [n_y^g] \\ n_x^n &\geq [n_x^n] & n_y^n &\geq [n_y^n] \end{aligned} \right\}. \tag{4}$$

Эти ограничения необходимы, чтобы в процессе изменения параметров задачи пространственная структурная конструкция не вырождалась в плоскую конструкцию. Таким образом, конструкция будет оставаться пространственной пока количество узлов в поясных сетках структуры в направлениях ширины или длины конструкции будет не меньше двух, то есть: $[n_x] = 2$ или $[n_y] = 2$.

- б) Ограничения минимальной длины элементов:

$$l_i \geq [l_{\min}]. \tag{5}$$

Такое ограничение необходимо для того, чтобы в процессе изменения параметров задачи не происходило вырождение стержней из-за приобретения ими нулевой длины. Кроме того, в это ограничение могут быть включены конструктивные требования минимальной длины стержней. Например, для узлов "на ванной сварке" $[l_{\min}]$ определяется размерами кондуктора.

в) Ограничения на максимальную длину величины стрелы подъема поясных сеток в направлениях ширины и длины конструкции:

$$\left. \begin{aligned} f_x^e + f_y^e &\leq L_x \\ f_x^e + f_y^e &\leq L_y \\ f_x^h + f_y^h &\leq L_x \\ f_x^h + f_y^h &\leq L_y \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где f_x^e — стрела подъема верхней поясной сетки в направлении ширины конструкции; f_y^e — стрела подъема верхней поясной сетки в направлении длины конструкции; f_x^h — стрела подъема нижней поясной сетки в направлении ширины конструкции; f_y^h — стрела подъема нижней поясной сетки в направлении длины конструкции; L_x — ширина конструкции; L_y — длина конструкции.

г) Ограничения высоты конструкции на опоре.

Практика проектирования структурных плит показала, что значения оптимальной высоты плоских структур находится в пределах $((1/15): (1/25))L$, где L — пролёт конструкции [2]. При исследованиях структурных конструкций установлено, что при изменении высоты на опоре с $1/24$ до $1/12$ пролёта масса конструкции растет [3]. Для структурных плит со стержнями из круглых труб эта зависимость выражена сильнее, чем для структур из уголков. В то же время, из опыта проектирования стержневых оболочек и сетчатых двухпоясных куполов известно, что высота у них по сравнению с плоскими конструкциями меньше за счет работы конструкции как распорной. При наличии жесткого опорного контура сетчатые оболочки проектируют и одно-сетчатыми, которые можно рассматривать как частный случай двухсет-

чатой оболочки с высотой конструкции равной нулю. При поиске оптимальной формы структурных конструкций геометрия исследуемых конструкций будет меняться от плоских структурных плит до двухсетчатых оболочек различной гауссовой кривизны (в том числе и двоякой кривизны). Поэтому разумно установить верхний предел изменения высоты на опоре не больше, чем в плоских структурных плитах, то есть $(1/15)L$. Нижний предел должен определяться ограничением подобным ограничению (5). Таким образом, эту группу ограничений запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} h &\geq [l_{\min}] \\ h &\leq \left(\frac{1}{15}\right) \cdot L \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $L = \{L_x, L_y\}$.

д) Ограничения на недопущение пересечения верхнего и нижнего поясов конструкции в пролете.

При различных стрелах подъема нижней и верхней поясных сеток возможно пересечение поясов конструкции, которое приводит к изменению топологии конструкции (рис. 7). Постановкой же задачи было определено, что

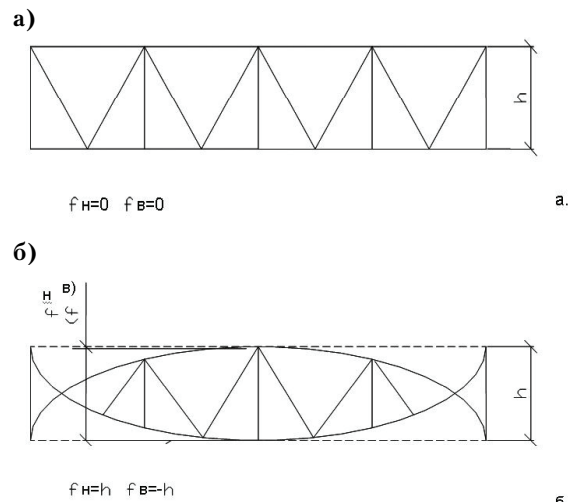


Рис. 7. Ограничения на вырождение конструкции: а — плоская структурная плита; б — вырожденная структурная конструкция с пересекающимися поясами.

конструкция в процессе оптимизации сохраняет неизменную топологию. Кроме того, пересечение поясов структуры может привести к вырождению стержней (например, стоек или раскосов), которые приобретают нулевую длину. Учитывая сказанное, необходимо наложить ограничения на недопущение пересечения поясов.

Не допустить пересечения поясов структуры можно, контролируя алгебраическую сумму их стрел подъема с одновременным контролем высоты конструкции на опоре. Рассмотрим возможные случаи геометрической формы структурной конструкции при вариации стрел подъема её нижнего и верхнего поясов (рис. 8).

Под стрелами подъема (рис. 8) поясных сеток ($f'_o=0, f'_n=0$) следует понимать максимальную стрелу подъема характерного узла поясной сетки. Для пространственной конструкции таким узлом является центральный узел, расположенный в середине конструкции как по отношению её длины, так и в отношении её ширины. Общая стрела подъема поясной сетки

складывается из стрел подъема ее контурных кривых. Стрелы подъема контурных кривых поясной сетки следует отсчитывать от плоскости, образуемой угловыми узлами рассматриваемых конструкций. Эта плоскость для структурных плит совпадает с плоскостью поясной сетки. Для структурных плит стрелы подъема контурных кривых поясных сеток равны нулю ($f'_{nx}=0, f'_{ny}=0, f'_{cy}=0$). Таким образом, в принятых на рис. 8 обозначениях, под f'_o и f'_n следует подразумевать сумму стрел подъема поясной сетки в направлении ширины и длины конструкции, то есть:

$$\left. \begin{aligned} f'_o &= f'_x + f'_y \\ f'_n &= f''_x + f''_y \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Кружками на рисунке 8 обозначены случаи вырождения конструкции (изменения топологии), то есть случаи недопустимые постановкой задачи.

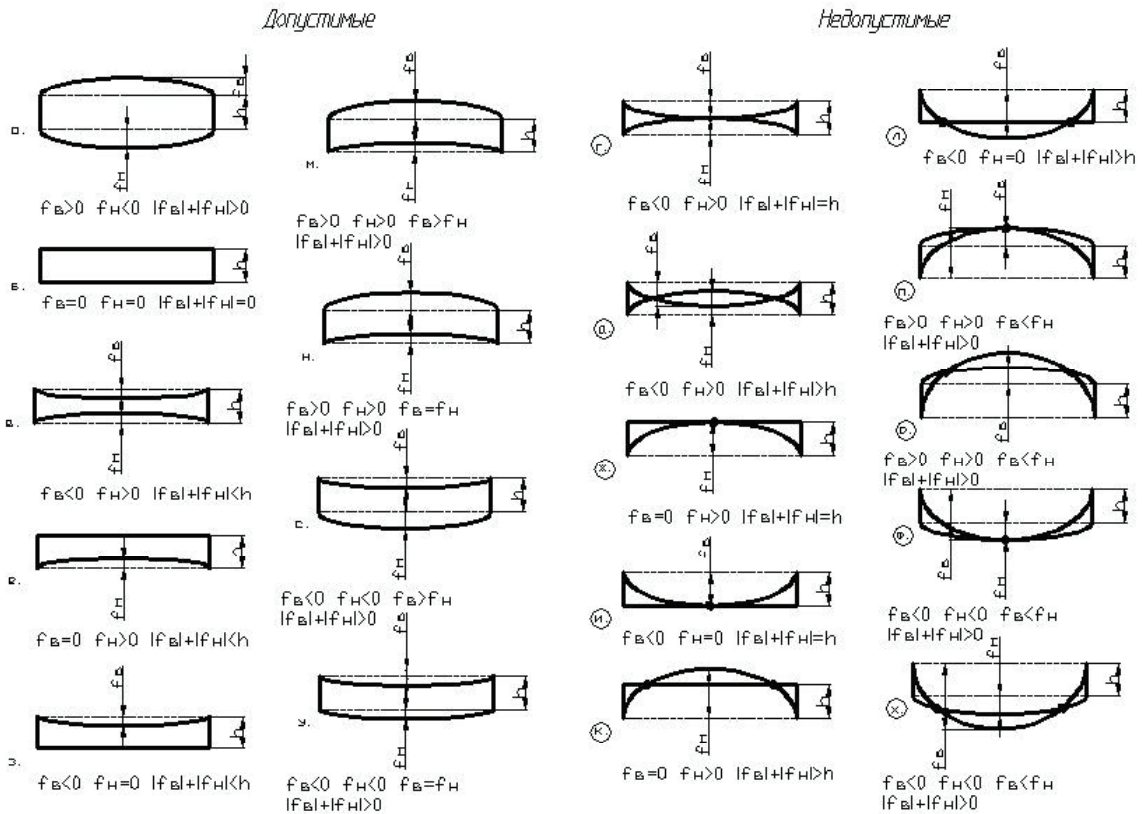


Рис. 8. Возможные геометрические формы пространственно-стержневых конструкций.

Обобщая приведенные на рисунках возможные случаи комбинации стрел подъема поясных сеток, запишем ограничения на недопущение пересечения поясов конструкции в виде:

$$\left. \begin{array}{l} f_{\sigma} \leq -\frac{h}{2} \\ f_{\sigma} = 0 \\ f_{\sigma} \leq -h \\ f_{\sigma} > 0 \\ f_{\sigma} < 0 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} f_{\eta} \geq \frac{h}{2} \\ f_{\eta} \geq h \\ f_{\eta} = 0 \\ f_{\eta} > 0 \\ f_{\eta} < 0 \end{array} \right\} (9) \quad \left. \begin{array}{l} f_{\sigma} \leq f_{\eta} - h \\ f_{\sigma} \geq f_{\eta} + h \end{array} \right\}$$

где f_{σ} и f_{η} следует определять по выражениям (8).
е) Ограничения на вырождение стержней (по площади поперечного сечения):

$$F_i \leq [F_{\min}]. \quad (10)$$

Эта группа ограничений призвана обеспечить сохранение топологии конструкции и обеспечение её геометрической неизменяемости. В процессе оптимизации статически неопределимая конструкция стремится выродиться в статически определимую, у которой все "лишние" стержни приобретают нулевую площадь. Исключение любого стержня (приобретение нулевой площади) из конструкции приводит к изменению первоначальной топологии конструкции, а следовательно, противоречит постановке задачи. Поэтому возникает необходимость в учете ограничений (10).

В качестве функции цели был выбран объем конструкции, однако на этапе решения одной из подзадач — оптимальный подбор сечений элементов в конструкции с заданной и неизменяемой геометрией — наряду с критерием объема в рассмотрение вводился второй критерий — жесткость. Эта подзадача формулировалась как двухпараметрическая. Появление подзадачи в рамках общей оптимизационной задачи было вызвано применением декомпозиции. В результате чего решение общей задачи оптимизации формы пространственно-стержневой конструкции искалось как общее решение подзадач двойной вложенности. То есть общая задача была разделена на подзадачу высокого уровня — поиск оптимальной геометрии поясных сеток

структурной конструкции и задачу низкого уровня — поиск оптимального распределения материала в конструкции с заданной и неизменяемой геометрией.

Общая постановка задачи формулируется следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{найти вектор } \tilde{X} \in \Omega \text{ такой, чтобы} \\ f(\tilde{X}) \leq f(X) \text{ для любого } X \in \Omega \end{array} \right\}, (11)$$

где f — количество варьируемых параметров конструкции, r — количество ограничений, накладываемых на целевую функцию, $\Omega = \{X : g_j(X) \leq 0, j = 1, \dots, r\}$ — допустимое множество или допустимая область параметров.

Решение этой задачи выполнялось с применением метода случайного поиска (для задачи высокого уровня) и метода направленного перебора (для задачи низкого уровня вложенности). К решению задачи был привлечен математический аппарат с реализацией его на ЭВМ. Создан алгоритм и написаны вспомогательные программы для ЭВМ, которые были объединены с решающим ядром программного комплекса "Мираж" и программного комплекса по оптимальному подбору сечений элементов металлических конструкций "ПСМК". В полуавтоматическом режиме производился численный эксперимент по поиску оптимальной геометрии поясных сеток структурных конструкций шести указанных ранее топологий. В результате определена оптимальная геометрическая форма пространственно-стержневой конструкции покрытия на прямоугольном плане, выполняемой без учета унификации элементов и без ограничений на тип узлового соединения, для определенной схемы загрузки,

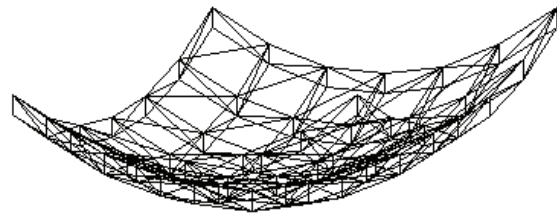


Рис. 9. Структурная конструкция оптимальной геометрии.

при определенной схеме закрепления конструкции, применительно к сортаменту из прокатных уголков в дискретной постановке. Найденная геометрическая форма (см. рисунок 9) является продуктом теоретических исследований. При ее определении не вводились в рассмотрение многие важные ограничения, например, такие как технология выполнения кровельного покрытия, решения системы водоотведения и прочее.

Литература

1. Трофимов В.И., Бегун Г.Б. Структурные конструкции. (Исследование, расчет, проектирование) — М.: Стройиздат, 1972. —272 с., ил.
2. Рекомендации по проектированию структурных конструкций/ Центр, нии строительных конструкций им. Кучеренко. —М.; Стройиздат, 1984. —303 с.
3. Клячин А.З. Металлические решётчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). — Екатеринбург: Диамант, 1994. —276 с.
4. Файбишенко В. К. Металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов. —М.: Стройиздат, 1984. —336 с, ил.
5. Лазарев И.Б. Основы оптимального проектирования конструкций. Задачи и методы. Сибирская государственная академия путей сообщения, 1994. с.
6. Холопов И. С. Оптимизация стержневых систем применительно к САПР. Диссертация на соискание степени доктора технических наук. — М., 1992.
7. Алпатов В.Ю. Оптимальное проектирование металлических структур. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Самара, 2002.

Алпатов Вадим Юрьевич является заместителем первого проректора (по науке и инновациям) Самарского государственного архитектурно-строительного университета, доцентом кафедры "Металлические и деревянные конструкции". Научные интересы: оптимальное проектирование металлических конструкций зданий и сооружений различного назначения, вопросы создания облегченных металлических конструкций, пространственные конструкции покрытий зданий и сооружений.

Холопов Игорь Серафимович является заведующим кафедрой "Металлические и деревянные конструкции", директором Строительного института Самарского Государственного Архитектурно-Строительного Университета, доктор технических наук, профессор. Академик Академии транспорта РФ, Советник РААСН, заслуженный работник высшей школы. Научные интересы: теория оптимального проектирования металлических стержневых систем, расчет зданий на пульсационные и сейсмические воздействия.

Алпатов Вадим Юрійович є заступником першого проректора (з науки й інновацій) Самарського державного архітектурно-будівельного університету, доцентом кафедри "Металеві і дерев'яні конструкції". Наукові інтереси: оптимальне проектування металевих конструкцій будинків і споруд різного призначення, питання створення полегшених металевих конструкцій, просторові конструкції покрить будинків і споруд.

Холопов Ігор Серафимович є завідувачем кафедри "Металеві і дерев'яні конструкції", директором Будівельного інституту Самарського державного архітектурно-будівельного університету, доктор технічних наук, професор. Академік Академії транспорту РФ, Радник РААСН, заслужений працівник вищої школи. Наукові інтереси: теорія оптимального проектування металевих стержневих систем, розрахунок будинків на пульсаційні і сейсмічні впливи.

Alpatov Vadim Yur'yevich is a deputy pro-rector in science and innovations of Samara State University of Architecture and Civil Engineering, an Associate professor of the department "Metal and Wood Structures". Scientific interests: an optimum designing of metal building structures of various purposes, creation of lightweight metal designs, spatial structures of building and structure coverings.

Kholopov Igor Serofimovich is Head of the Department "Metal and Wood Structures", director of Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Dr. Sc. (Eng.), professor. An academician of the Academy of Transport of the Russian Federation, an adviser of the RAABS, an Honored Worker of higher school. Scientific interests: theory of an optimum designing of metal rod systems, calculation of buildings on pulsation and seismic influences.