

УДК 624.023.87(088.8)

Управляемые конструкции пространственных покрытий из перекрестных систем Часть 1

Марутян А.С., к.т.н.

Филиал Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске,
Российская Федерация

Анотація. Показано, що управління параметрами несучих конструкцій будівель і споруд є тим інструментом, за допомогою якого можна покращувати їх фізико-механічні властивості (міцність, жорсткість, стійкість, надійність, сейсмостійкість тощо), а також техніко-економічні характеристики (витрата конструкційного матеріалу, трудомісткість, вартість, екологічність, транспортбельність, терміновість тощо). Наведено методику управління напружено-деформованим станом легких металевих конструкцій з перехресних систем. Її суть полягає в переході опорних вузлів контурних ферм від шарнірних до жорстких кріплень з регульованими реактивними (опорними) моментами за рахунок попереднього напруження. Таке регулювання супроводжується досить значним зменшенням прогинів та істотним зниженням витрати конструкційного матеріалу.

Аннотация. Показано, что управление параметрами несущих конструкций зданий и сооружений является тем инструментом, при помощи которого можно улучшать их физико-механические свойства (прочность, жесткость, устойчивость, надежность, сейсмостойкость и т. п.), а также технико-экономические характеристики (расход конструкционного материала, трудоемкость, стоимость, экологичность, транспортабельность, срочность и т. п.). Приведена методика управления напряженно-деформированным состоянием легких металлических конструкций из перекрестных систем. Ее суть заключается в переходе опорных узлов контурных ферм от шарнирных к жестким креплениям с регулируемыми реактивными (опорными) моментами за счет предварительного напряжения. Такое регулирование сопровождается весьма значительным уменьшением прогибов и существенным снижением расхода конструкционного материала.

Abstract. It is shown that parameter control of load bearing structures of buildings and installations is a tool to improve their mechanical properties (strength, stiffness, stability, reliability, seismic resistance, etc.), as well as technical and economic characteristics (expenditure of structural material, labour intensity, cost, environmental friendliness, portability, maturity, etc.). The technique is presented for control of the stress-strain state of light metal structures from cross-systems. Its essence is to move the support units of contour trusses from hinged fastening to rigid attachment with adjustable jet (reference) moments due to pre-stressing. Such adjustment is accompanied by a very significant reduction of deflections and a significant reduction in consumption of construction material.

Ключевые слова: управление, регулирование, напряженно-деформированное состояние, легкие металлические конструкции, перекрестные системы.

Управление параметрами несущих конструкций зданий и сооружений преследует цель улучшать их физико-механические свойства (прочность, жесткость, устойчивость, надежность, сейсмостойкость и т. п.), а также технико-экономические характеристики и свойства (расход конструкционного материала, трудоемкость, стоимость, экологичность, транспортабельность, срочность и т. п.) [1, 2]. Разработка и развитие подобных конструкций требуют системного подхода, результатами которого становятся весьма гармоничные образцы, такие как пространственно-стержневые (кристаллические) структурные плиты покрытий или перекрытий [3, 4]. Разновидностью отмеченных структур являются легкие металлические конструкции комплектной поставки с использованием перекрестных систем из гнутосварных профилей (рис. 1) [5, 6].

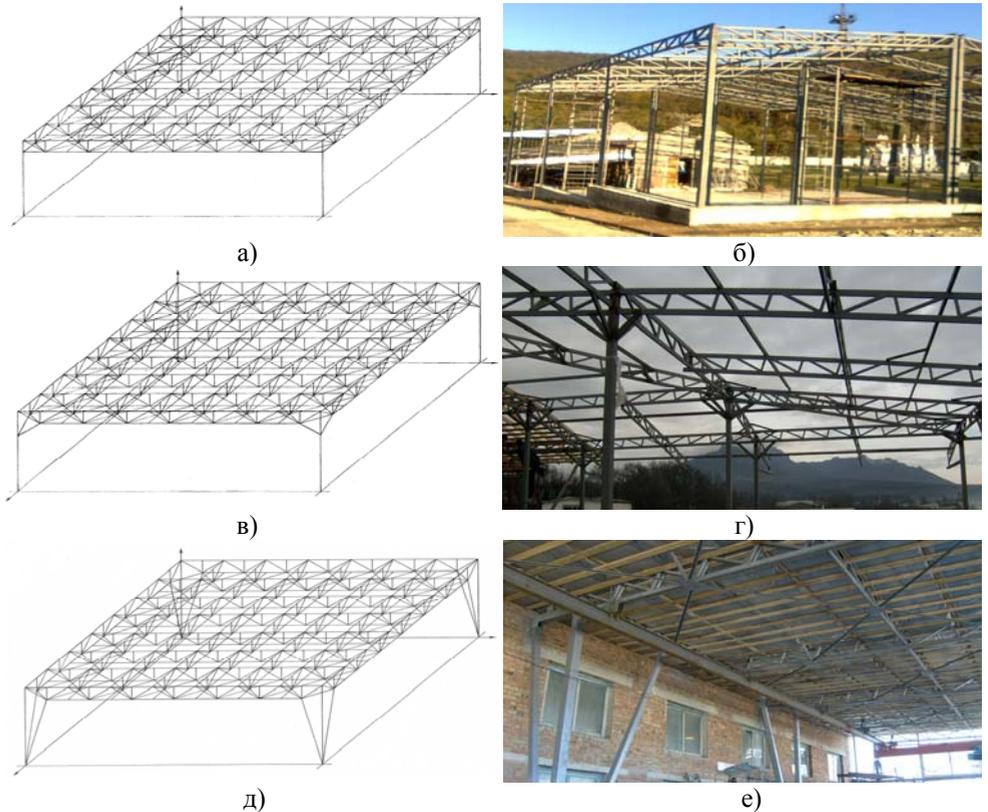


Рис. 1. Расчетная схема и снимок пространственного покрытия из перекрестной системы с припорными панелями нижних поясов контурных ферм (а, б); расчетная схема и снимок пространственного покрытия из перекрестной системы с подкосами контурных ферм (в, г); расчетная схема и снимок пространственного покрытия из перекрестной системы с наклонными ветвями V-образных колонн (д, е)

Для повышения степени унификации несущих элементов перекрестных систем управление их параметрами можно реализовывать при помощи технического решения, в котором площади сечения поясов контурных несущих элементов $A_{\hat{E}}$ и площади сечения поясов внутренних несущих перекрестных элементов $A_{\hat{A}}$ связаны соотношением:

$$\dot{A}_{\hat{E}} / \dot{A}_{\hat{A}} = 0,5n \dots 0,5(n + 2), \quad (1)$$

где n – число членений несущими элементами стороны плана покрытия на одинаковые или почти одинаковые отрезки, $4 \leq n$ [7].

Приведенное решение эффективно нивелирует напряженно-деформированное состояние за счет перераспределения усилий во внутренних несущих элементах, но оставляет значительную разницу относительно контурных. Так, $\dot{A}_{\hat{E}} / \dot{A}_{\hat{A}} = 2 \dots 3$ уже при $n \times n = 4 \times 4$ и $\dot{A}_{\hat{E}} / \dot{A}_{\hat{A}} = 3,5 \dots 4,5$ при $n \times n = 7 \times 7$. Поэтому дальнейшее управление возможно при помощи колонн переменной жесткости или другого технического решения, например, опорных (карнизных) узлов с регулируемым предварительным напряжением. Суть подобного решения заключается в перераспределении реактивных (опорных) и пролетных моментов контурных несущих элементов перекрестных систем (рис. 2) [8], что условно можно представить в следующем виде:

- $M_R = 0$ при $M = M_{\max}$;
- $M_R = -M_{\max} / 4$ при $M = 3M_{\max} / 4$;
- $M_R = -M_{\max} / 2$ при $M = M_{\max} / 2$;
- $M_R = -3M_{\max} / 4$ при $M = M_{\max} / 4$;
- $M_R = -M_{\max}$ при $M = 0$,

где M_R – реактивный (опорный) момент; M – пролетный момент; M_{\max} – наибольший (балочный) момент.

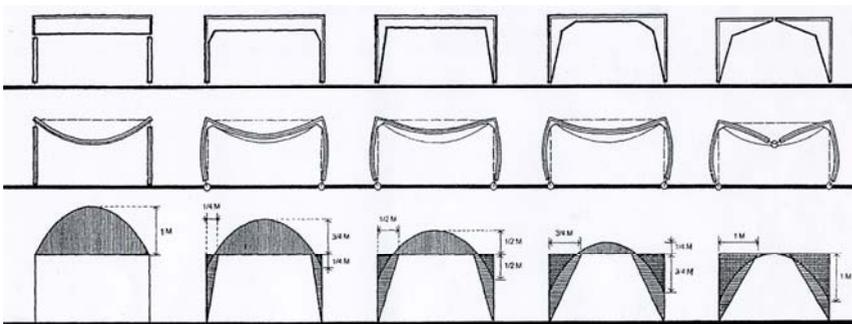


Рис. 2. Схемы управления параметрами несущих конструкций с перераспределением реактивных и пролетных моментов

Для контурных ферм (элементов) перекрестных систем с количеством ячеек $4 \times 4 \leq n \times n$ (рис. 3) применим балочный аналог с линейной нагрузкой q , распределенной параболически по всей длине пролета l [9]:

— при шарнирных опорах [10]:

$$0 \leq z \leq l, q_z = 4qz(l-z)/l^2, Q = (ql/3)(1 - 6z^2/l^2 + 4z^3/l^3),$$

$$M = (ql^2/3)(z/l - 2z^3/l^3 + z^4/l^4), \quad (2)$$

$$z = l/2, M_{\max} = 5ql^2/48, f_{\max} = 61ql^4/(5760EI), \quad (3)$$

$$z = 0, Q = ql/3, z = l, Q = -ql/3; \quad (4)$$

— при жестких опорах [9, 10]:

$$z = 0, Q = ql/3, z = l, Q = -ql/3, \quad (5)$$

$$z = 0 \text{ и } z = l, M_R = -ql^2/15, \quad (6)$$

$$z = l/2, M_{\max} = 3ql^2/80,$$

$$f = f_{\max} - (M_R + M_R)l^2/(16EI) = 61ql^4/(5760EI) - (ql^2/15 + ql^2/15)l^2/(16EI) = 13ql^4/(5760EI), \quad (7)$$

где z – координата рассматриваемого сечения балочного аналога; q_z – интенсивность параболической нагрузки в сечении с координатой z ; Q – поперечная сила; f и f_{\max} – прогиб и наибольший прогиб балочного аналога; E – модуль продольной упругости конструкционного материала; I – момент инерции сечения.

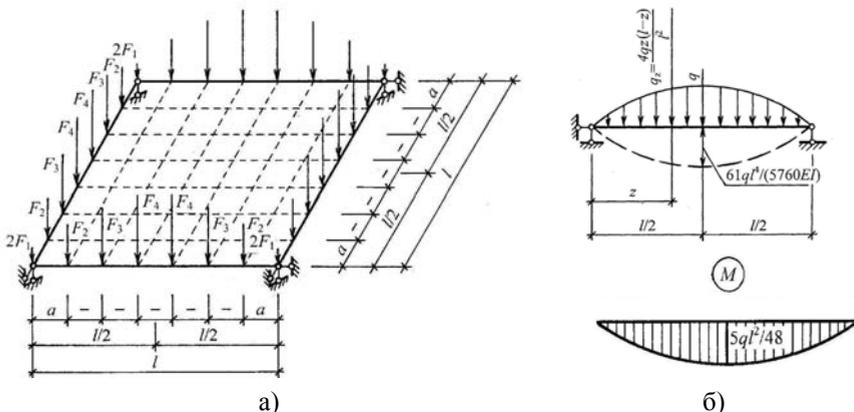


Рис. 3. Расчетные схемы контурных элементов (ферм) перекрестной системы (а) и их балочного аналога (б)

Из сравнения формул (3) и (7) видно, что с заменой шарнирных опор на жесткие при прочих равных условиях прогиб уменьшается в $61/13=4,69$ раза, то есть во столько же раз увеличивается жесткость (одно из важнейших механических свойств несущих конструкций). Определенный практический интерес представляет изменение прогибов при переходе на жесткие опоры с регулируемыми реактивными моментами:

1. $M_R = 0$,

$$f = 61ql^4 / (5760EI) = ql^4 (94,43EI); \quad (8)$$

2. $M_R = -M_{\max} / 4 = -(5ql^2 / 48) / 4 = -5ql^2 / 192$,

$$\begin{aligned} f &= f_{\max} - (M_R + M_R)l^2 / (16EI) = \\ &= 61ql^4 / (5760EI) - (15ql^2 / 192 + 15ql^2 / 192)l^2 / (16EI) = \\ &= 507ql^4 / (69120EI) = ql^4 / (136,3EI), \end{aligned} \quad (9)$$

то есть прогиб уменьшается в $136,3/94,43 = 1,44$ раза;

3. $M_R = -M_{\max} / 2 = -(5ql^2 / 48) / 2 = -5ql^2 / 96$,

$$\begin{aligned} f &= f_{\max} - (M_R + M_R)l^2 / (16EI) = \\ &= 61ql^4 / (5760EI) - (ql^2 / 96 + ql^2 / 96)l^2 / (16EI) = \\ &= 47ql^4 / (11520EI) = ql^4 / (245,1EI), \end{aligned} \quad (10)$$

то есть прогиб уменьшается в $245,1/94,43 = 2,59$ раза;

4. $M_R = -3M_{\max} / 4 = -3(5ql^2 / 48) / 4 = -15ql^2 / 192$,

$$\begin{aligned} f &= f_{\max} - (M_R + M_R)l^2 / (16EI) = \\ &= 61ql^4 / (5760EI) - (15ql^2 / 192 + 15ql^2 / 192)l^2 / (16EI) = \\ &= 57ql^4 / (69120EI) = ql^4 / (1213EI), \end{aligned} \quad (11)$$

то есть прогиб уменьшается в $1213/94,43 = 12,8$ раза;

5. $M_R = -M_{\max} = -5ql^2 / 48$,

$$\begin{aligned} f &= f_{\max} - (M_R + M_R)l^2 / (16EI) = \\ &= 61ql^4 / (5760EI) - (5ql^2 / 48 + 5ql^2 / 48)l^2 / (16EI) = \\ &= -7ql^4 / (2880EI) = -ql^4 / (411,4EI), \end{aligned} \quad (12)$$

то есть вместо прогиба имеет место выгиб в обратном направлении, который по абсолютной величине в $411,4/94,43 = 4,35$ раза меньше «эталонного» прогиба (прогиба при шарнирных опорах).

Полученные соотношения прогибов весьма показательно подтверждают эффективность приведенного метода управления. Однако их выкладки сделаны при допущении неизменности изгибной жесткости ($EI = const$). Поэтому для уточнения жесткостных параметров необходимо после статического расчета сделать подбор сечений контурных элементов перекрестных систем. Такой подбор позволяет попутно оценить, каким образом описываемое управление отражается на материалоемкости (металлоемкости), которая относится к числу наиболее важных технико-экономических характеристик несущих конструкций зданий и сооружений. В качестве базового объекта целесообразно принять расчет и проектирование здания-модуля с количеством ячеек $n \times n = 7 \times 7$ и размерами в плане $l \times l = 42 \times 42$ м ($a \times a = 6 \times 6$ м – размеры ячеек) [11].

При управлении параметрами легких металлических конструкций здания-модуля за счет варьирования абсолютных величин реактивных моментов ($M_R = 0$, $M_R = -M_{\max} / 4$, $M_R = -M_{\max} / 2$, $M_R = -3M_{\max} / 4$, $M_R = -M_{\max}$) приняты следующие допущения:

- полная нагрузка составляет $p = 0,320$ тс/м² и включает постоянную нагрузку $p_g = 0,140$ тс/м², а также временную (снеговую) – $s_g = 0,180$ тс/м² (III снеговой район);
- контурные фермы на монтаже собирают при помощи болтовых стыков из отправочных марок длиной, равной размеру ячеек перекрестной системы ($a = 6$ м);
- подбор сечений поясных элементов контурных ферм ограничен квадратными гнутосварными профилями из сортамента, использованного в базовом объекте;
- в качестве «эталонного» варианта для сравнения приняты контурные фермы с шарнирными опорами ($M_R = 0$).

Некоторые результаты статического расчета и подбора сечений представлены на рис. 4 и в таблице 1, где приведены итоговые значения усилий от совместного действия предварительного напряжения и полной нагрузки, а в скобках указаны итоговые значения усилий от совместного действия предварительного напряжения и постоянной нагрузки.

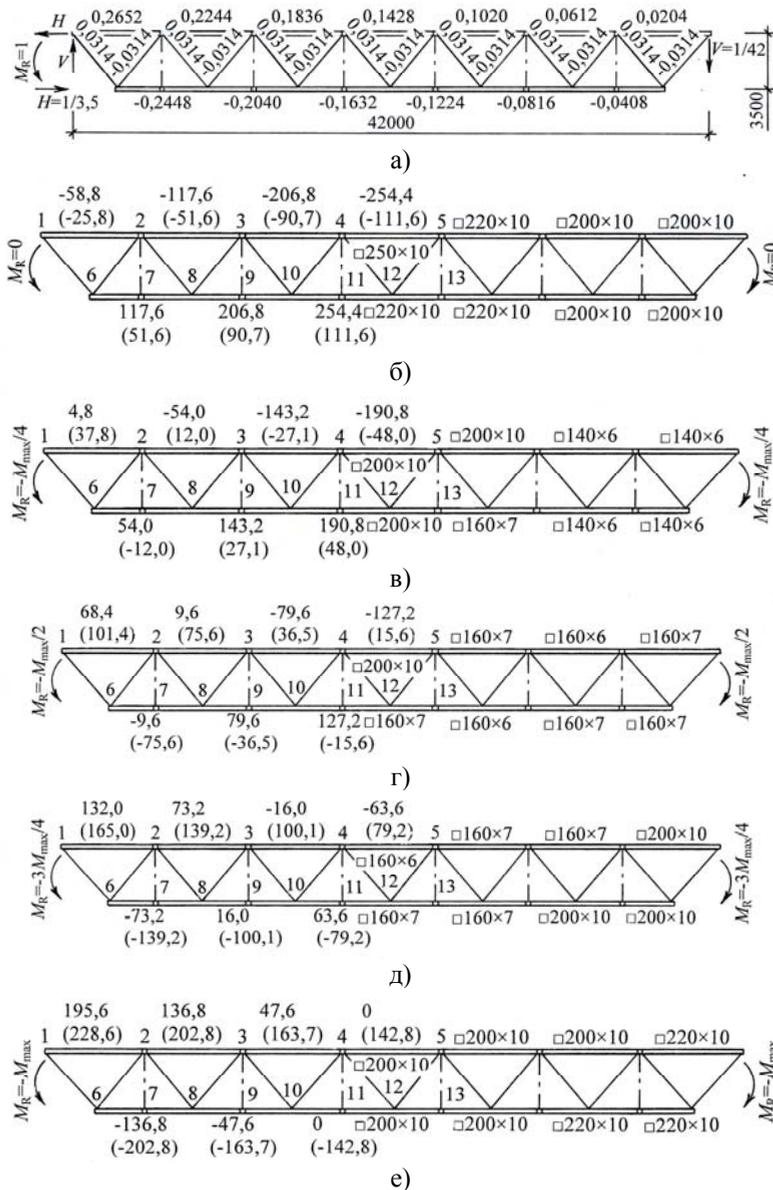


Рис. 4. Схемы контурных ферм перекрестной системы с результатами статического расчета и подбора сечений при действии реактивных (опорных) моментов: а – $M_R = 1$; б – $M_R = 0$; в – $M_R = -M_{max} / 4$; г – $M_R = -M_{max} / 2$; д – $M_R = -3M_{max} / 4$; е – $M_R = -M_{max}$ (знак минус соответствует сжимающим усилиям; размерность усилий – тс; в скобках указаны итоговые значения усилий от совместного действия предварительного напряжения и постоянной нагрузки)

Таблиця 1

Расчет массы поясных элементов контурных ферм

| Момент | Пояса | № элемента | Сечение, мм | Длина, мм | Кол-во, шт. | Масса, кг | | | Поясов |
|-------------------|---------|------------|-------------|-----------|-------------|-----------|---------|----------------|-----------------|
| | | | | | | 1 м | элемент | всех элементов | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $M_R=0$ | Верхний | 1-2 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | 4667 (100%) |
| | | 2-3 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 3-4 | □220×10 | 6000 | 2 | 62,50 | 375,0 | 750 | |
| | | 4-5 | □250×10 | 6000 | 1 | 71,90 | 431,4 | 431,4 | |
| | Нижний | 6-7 | □200×10 | 3000 | 2 | 56,20 | 168,6 | 337,2 | |
| | | 7-8-9 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 9-10-11 | □220×10 | 6000 | 2 | 62,50 | 375,0 | 750 | |
| | | 11-12-13 | □220×10 | 6000 | 1 | 62,50 | 375,0 | 375 | |
| $M_R=-M_{max}/4$ | Верхний | 1-2 | □140×6 | 6000 | 2 | 25,24 | 151,44 | 302,88 | 3184 (68,2%) |
| | | 2-3 | □140×6 | 6000 | 2 | 25,24 | 151,44 | 302,88 | |
| | | 3-4 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 4-5 | □200×10 | 6000 | 1 | 56,20 | 337,2 | 337,2 | |
| | Нижний | 6-7 | □140×6 | 3000 | 2 | 25,24 | 75,72 | 151,44 | |
| | | 7-8-9 | □160×7 | 6000 | 2 | 33,63 | 201,78 | 403,56 | |
| | | 9-10-11 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 11-12-13 | □200×10 | 6000 | 1 | 56,20 | 337,2 | 334,2 | |
| $M_R=-M_{max}/2$ | Верхний | 1-2 | □160×7 | 6000 | 2 | 33,63 | 201,78 | 403,56 | 2593 (55,6%) |
| | | 2-3 | □160×6 | 6000 | 2 | 29,01 | 174,06 | 348,12 | |
| | | 3-4 | □160×7 | 6000 | 2 | 33,63 | 201,78 | 403,56 | |
| | | 4-5 | □200×10 | 6000 | 1 | 56,20 | 337,2 | 337,2 | |
| | Нижний | 6-7 | □160×7 | 3000 | 2 | 33,63 | 100,89 | 201,78 | |
| | | 7-8-9 | □160×6 | 6000 | 2 | 29,01 | 174,06 | 348,12 | |
| | | 9-10-11 | □160×6 | 6000 | 2 | 29,01 | 174,06 | 348,12 | |
| | | 11-12-13 | □160×7 | 6000 | 1 | 33,63 | 201,78 | 201,78 | |
| $M_R=-3M_{max}/4$ | Верхний | 1-2 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | 3002 (64,3%) |
| | | 2-3 | □160×7 | 6000 | 2 | 33,63 | 201,78 | 403,56 | |
| | | 3-4 | □160×7 | 6000 | 2 | 33,63 | 201,78 | 403,56 | |
| | | 4-5 | □160×6 | 6000 | 1 | 29,01 | 174,06 | 174,06 | |
| | Нижний | 6-7 | □200×10 | 3000 | 2 | 56,20 | 168,6 | 337,2 | |
| | | 7-8-9 | □160×7 | 6000 | 2 | 33,63 | 201,78 | 403,56 | |
| | | 9-10-11 | □160×7 | 6000 | 2 | 33,63 | 201,78 | 403,56 | |
| | | 11-12-13 | □160×7 | 6000 | 1 | 33,63 | 201,78 | 201,78 | |
| $M_R=-M_{max}$ | Верхний | 1-2 | □220×10 | 6000 | 2 | 62,50 | 375,0 | 750 | 4497 (96,4%) |
| | | 2-3 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 3-4 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 4-5 | □200×10 | 6000 | 1 | 56,20 | 337,2 | 337,2 | |
| | Нижний | 6-7 | □220×10 | 3000 | 2 | 62,50 | 187,5 | 375,0 | |
| | | 7-8-9 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 9-10-11 | □200×10 | 6000 | 2 | 56,20 | 337,2 | 674,4 | |
| | | 11-12-13 | □200×10 | 6000 | 1 | 56,20 | 337,2 | 337,2 | |

Как видно, минимальный расход конструкционного материала имеет место, когда посредством предварительного напряжения величина максимального балочного момента перераспределяется между опорами и пролетом поровну. При этом следует заметить, что экономический эффект может оказаться более весомым с расширением сортамента сечений за счет ГОСТ Р 54157-2010 «Трубы стальные профильные для металлоконструкций».

Подобранные сечения поясных элементов позволяют уточнить жесткостные характеристики контурных ферм перекрестной системы и вычислить значения их прогибов $f_{\hat{E}}$ в середине пролета [12]:

$$f_{\hat{E}} = k_{fu} k_{fp} f / k_I, \quad (13)$$

где k_{fu} – коэффициент влияния податливости монтажных соединений, при монтаже на болтах $k_{fu} = 1,1$; k_{fp} – коэффициент влияния податливости решетки фермы,

$$k_{fp} = 1 + 2,4h/l = 1 + 2,4 \times 3,5/42 = 1,2;$$

f – соответствующее значение прогиба балочного аналога, вычисленное по одной из формул (8), (9), (10), (11) или (12); k_I – коэффициент влияния изменения сечений по длине поясов ферм,

$$k_I = (\Sigma(I_i l_i)_{\hat{A}\hat{I}} + \Sigma(I_i l_i)_{\hat{I}\hat{I}}) / (I_{\max \hat{A}\hat{I}} l_{\hat{A}\hat{I}} + I_{\max \hat{I}\hat{I}} l_{\hat{I}\hat{I}}); \quad (14)$$

$I_{i\hat{A}\hat{I}}$ и $I_{i\hat{I}\hat{I}}$ – моменты инерции сечений i -ой панели соответственно верхнего и нижнего поясов; l_i – длина i -ой панели пояса; $I_{\max \hat{A}\hat{I}}$ и $I_{\max \hat{I}\hat{I}}$ – наибольшие моменты инерции сечений соответственно верхнего и нижнего поясов; $l_{\hat{A}\hat{I}}$ и $l_{\hat{I}\hat{I}}$ – длины соответственно верхнего и нижнего поясов.

Вычисленные значения прогибов собраны в таблице 2, где знак минус обозначает не прогиб, но выгиб. Здесь перераспределение за счет предварительного напряжения величины максимального балочного момента между опорами и пролетом поровну отличается не только минимальной материалоемкостью, но и уменьшением прогиба в середине пролета более чем на одну треть.

Таблиця 2

Значения прогибов контурных ферм

| Реактивный момент | Прогиб, $f_{\dot{E}}$ | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------|-------|
| | мм | $f_{\dot{E}}/l$ | % |
| $M_R = 0$ | 275,9 | 1/152,2 | 100 |
| $M_R = -M_{\max}/4$ | 287,8 | 1/145,9 | 104,3 |
| $M_R = -M_{\max}/2$ | 168,2 | 1/249,7 | 61,0 |
| $M_R = -3M_{\max}/4$ | 27,09 | 1/1550 | 9,82 |
| $M_R = -M_{\max}$ | -56,45 | -1/744,0 | -20,5 |

Выводы

1. Управление параметрами легких металлических конструкций из перекрестных систем весьма перспективно и может сопровождаться качественным и количественным улучшением их физико-механических свойств и технико-экономических характеристик.
2. Переход от шарнирных опораний к жестким в перекрестных системах с количеством ячеек $n \times n = 7 \times 7$ ($4 \times 4 \leq n \times n$) обеспечивает минимальный расход конструкционного материала, когда посредством предварительного напряжения величина максимального балочного момента перераспределяется между опорами и пролетом поровну.
3. Переход от шарнирных опораний перекрестных систем к жестким максимально разгружает фундаменты и основания (или другие опорные конструкции), так как жесткие закрепления опорных конструкций (колонн), сосредоточенные в фундаментах, можно перенести и рассредоточить в несущих конструкциях покрытий и перекрытий.
4. Дальнейшим этапом разработки управляемых конструкций должно стать экономичное, но надежное техническое решение предварительного напряжения опорных (карнизных) узлов контурных ферм перекрестных систем.

Литература

- [1] Абовский Н. П. Управляемые конструкции : учебное пособие / Н. П. Абовский; КрасГАСА. – Красноярск, 1998. – 433 с.
- [2] Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций / А. В. Перельмутер. – М. : Издательство АСВ, 2011. – 183 с.
- [3] Трофимов В. И. Структурные конструкции (исследование, расчет, проектирование) / В. И. Трофимов, Г. Б. Бегун. – М. : Стройиздат, 1972. – 272 с.

- [4] Трофимов В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений : учебное пособие / В. И. Трофимов, А. М. Каминский. – М. : Издательство АСВ, 2002. – 576 с.
- [5] Марутян А. С. Разработка и исследование управляемых металлических конструкций нового поколения / А. С. Марутян // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 5. – С. 75–83.
- [6] Павленко Ю. И. Использование уравнений математической физики при исследовании динамических характеристик металлоконструкций / Ю. И. Павленко, И. М. Першин, А. С. Марутян // Материалы Международной молодежной научной конференции «Математическая физика и ее приложения» (МФП-2012) : в 5 т. – Пятигорск : СКФУ, 2012. – Т. 2. – С. 106–111.
- [7] А.с. 992689 СССР, МКИ Е 04 В 7/10. Пространственное покрытие / В. А. Аденский, М. Л. Гринберг, А. Я. Прицкер, В. Н. Шимановский, В. И. Трофимов, Б. А. Штепа, И. Л. Пименов, В. К. Чаадаев. – № 3313163/29-33; заявл. 03.06.1982 ; опубл. 30.01.1983, Бюл. № 4. – 3 с. : ил.
- [8] Atlante delle Strutture / Heino Engel and Hatje Cantz Verlag – Union Tipografico-Editrice Torinese, Torino, 2001. – P. 178–179.
- [9] Справочник по сопротивлению материалов / [Отв. ред. Писаренко Г. С.] – Киев : Наукова думка, 1988. – С. 130, 299, 353.
- [10] Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический : в 2 кн. / [Под ред. А. А. Уманского]. – М. : Стройиздат, 1972. – Кн. 1. – С. 389.
- [11] Марутян А. С. Легкие металлоконструкции из перекрестных систем / А. С. Марутян ; Пятигорский государственный технологический университет. – Пятигорск : РИА КМВ, 2009. – 348 с.
- [12] Марутян А. С. Приближенный расчет перекрестных систем на статические воздействия / А. С. Марутян, Ю. И. Павленко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 4. – С. 14–20.

Надійшла до редколегії 18.07.2016 р.