

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СТАЛЬНОЙ БАЛОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ С ПОДКОСАМИ И ЗАТЯЖКОЙ

Прозозин Я.А.¹, Корсун Н.Д.¹

¹ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия (625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2), e-mail: korsun1@ya.ru

На основе данных теоретического исследования и сравнительного анализа основных типов ЛМК разработана стальная балочная конструкция покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой, отличающаяся тем, что применен принцип минимизации площади эпюры моментов, предложенный проф. Н.С. Москалевым. Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние стальной балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой при различных расчетных ситуациях (монтаж, предварительное напряжение, испытание, эксплуатация) на примере расчетных моделей и натурных конструкций пролетами 18 и 24 м в составе покрытия. В результате исследований обосновано применение расчетной модели конструкции, разработан алгоритм расчета и определены активные параметры оптимизации конструкции по критерию минимального веса. Натурными испытаниями подтверждено, что деформированное состояние конструкций при выполнении предварительного напряжения балок и на этапах нагружения соответствует расчетным показателям. Экономический эффект от внедрения стальной балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой при строительстве объекта составил 7,6% от стоимости каркаса здания.

Ключевые слова: легкие металлические конструкции, новые конструктивные формы, параметрическая оптимизация, предварительное напряжение, экспериментально-теоретические исследования.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE STEEL CONSTRUCTION CONSISTS OF THE VARIABLE FLEXURAL RIGIDITY BEAM, KNEE BRACES AND CAB

Pronozin Y.A.¹, Korsun N.D.¹

¹Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Tyumen, Russia (625001, Tyumen, Lunacharskogo Str., 2), e-mail: korsun1@ya.ru

On the basis of theoretical research and comparative analysis of the main forms of civil engineering structures has been created the steel construction consists of the variable flexural rigidity beam, knee braces and cab, wherein has been applied the principle of minimization bending moment area proposed prof. N.S. Moskalev. The subject of research is the stresses and deformations by virtual work of steel variable flexural rigidity beams with knee braces and cab with spans of 18 and 24 m at various design situations (installation, pre-stress, testing, operation) and comparison with computer results. As a result of researches, the structural analysis in linear statement is proved, the algorithm of engineering calculation is developed and active parameters by optimizing the design of minimum weigh are defined. Field tests confirmed that the deformations of the steel construction when the beams pre-stressed and at stages of loading corresponds to calculations. Economic effect of introduction steel construction consists of the variable flexural rigidity beam, knee braces and cab amounted 7,6 % of the cost of building frame.

Keywords: steel construction of light industrial building, new forms of civil engineering structures, parameter's optimization, pre-stress, theoretical research, experimental study.

Введение

Совершенствование конструктивных решений легких металлических конструкций (ЛМК) является одним из направлений развития отрасли строительства как в России, так и за рубежом. Широкое распространение ЛМК обусловлено их высокой технологичностью, низкой материалоемкостью и высокой скоростью монтажных работ. В этой связи актуальным является решение задач по разработке новых форм ЛМК с целью их улучшения

и создания новых унифицированных серий в развитии номенклатуры типовых металлоконструкций.

На основе данных теоретического исследования и сравнительного анализа основных типов ЛМК разработана стальная балочная конструкция покрытия, отличающаяся тем, что применен принцип минимизации площади эпюры моментов, предложенный проф. Н.С. Москалевым [7]. Суть принципа сводится к эффективному перераспределению изгибающих моментов в балке из пролета к опорам: в случае передачи на опоры 75% балочного момента $M_0 = ql^2/8$ вес балки является наименьшим:

$$G = \frac{6\gamma}{R} \int_0^l \frac{M}{(3-2\alpha)} dx, \quad (1)$$

где $\int_0^l M dx = \Omega$ - площадь эпюры моментов.

Используя для площади эпюры моментов выражение $\Omega = kql^3$ и принимая отношение пролетного момента к балочному за параметр $\mu = M_{sp}/M_0$, получаем следующую зависимость $k - \mu$ (рис. 1).

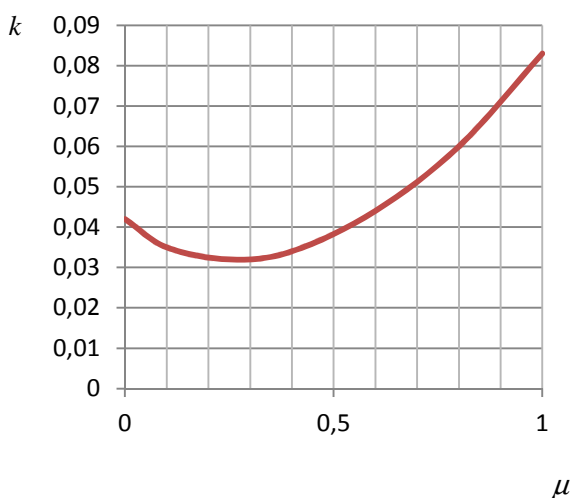


Рис. 1 – Зависимость $k - \mu$

Разработанная конструкция покрытия (рис. 2) представляет собой балку из прокатного двутавра с участками усиления полок листовыми накладками. Балка на участках наибольшей жесткости опирается на подкосы с образованием консолей, концы которых соединены с верхними концами надколонников, а нижние концы подкосов и надколонников соединены в узлах опирания конструкции на колонны и связаны затяжкой [3; 4].

Для получения необходимого распределения изгибающих моментов в балке используется предварительное напряжение конструкции путем смыкания зазоров в монтажных стыках затяжки и надколонников.

Проведенный технико-экономический анализ показал, что разработанная новая конструкция покрытия по приведенным затратам не уступает самым эффективным ЛМК покрытия на основе ферм «Молодечно» [5].

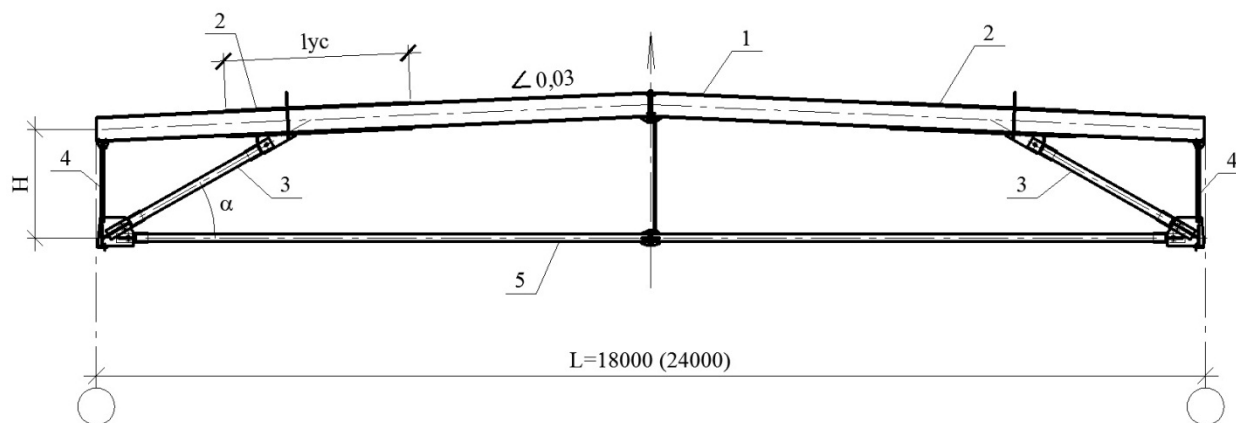


Рис. 2 – Стропильная конструкция покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой: 1 – балка; 2 – усиление балки над подкосом; 3 – подкос; 4 – надколонник; 5 – затяжка

Цель исследования: экспериментально и теоретически обосновать надежность работы стальной балочной конструкции покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой при различных расчетных ситуациях на примерах расчетных моделей и в ходе натурного испытания конструкций пролетами 18 и 24 м в составе покрытия, а также обосновать экономическую эффективность конструкции.

Методы исследования: для численных исследований конструкции применен программный комплекс SCAD, в основе работы которого использован МКЭ. Алгоритм расчета новой статически неопределимой конструкции построен на основе метода сил, метода предельных состояний и прямых методов подбора сечений. Для установления оптимальных геометрических параметров новой конструкции использованы методы теории планирования экспериментов.

Результаты исследования

Разработан алгоритм расчета новой конструкции покрытия, являющейся один раз статически неопределимой системой. Эффективное решение конструкции балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой формируется за шесть этапов.

1. Исходные данные для расчета (рис. 3а): q , кН/м; E , МПа; R_y , МПа; γ_c ; l , м; h , м; α град.; $\mu = M_{1(sp)}/M_0$.

2. Предварительное задание усилий и длин элементов:

$$M_1 = \mu q \frac{l_1^2}{8}; \quad (2)$$

$$M_2 = (1 - \mu) q \frac{l_1^2}{8}; \quad (3)$$

$$N_1 = N_2 = -(1 - \mu) q \frac{l^2}{8h} - \mu q \frac{la}{2h} + \mu q \frac{a^2}{2h}; \quad (4)$$

$$N_3 = N_1 / \cos \alpha; \quad (5)$$

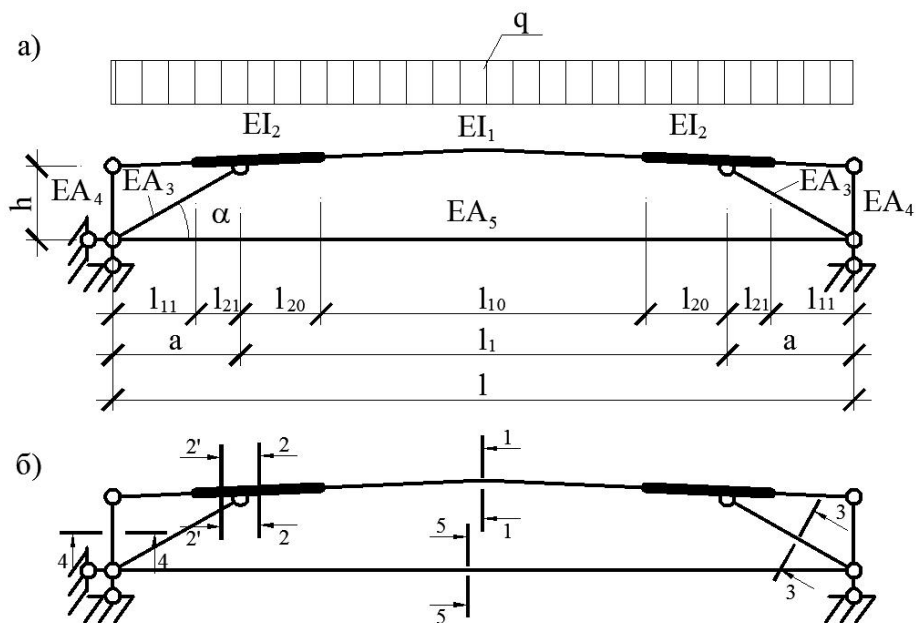


Рис. 3 – Данные для расчета конструкции

$$N_4 = -N_3 \sin \alpha + q l / 2 ; \quad (6)$$

$$N_5 = -N_1 , \quad (7)$$

$$l_{10} = \sqrt{\frac{16M_1}{q}} ; \quad (8)$$

$$l_{11} = \sqrt{\frac{N_4^2}{q^2} + \frac{2M_1}{q} - \frac{N_4}{q}} . \quad (9)$$

3. Подбор сечений элементов: балки – из условия устойчивости внецентренно сжатого элемента, усиления балки над подкосом – из условия прочности на сжатие с изгибом, подкоса – из условия устойчивости на центральное сжатие, надколонника и затяжки – из условий на центральное растяжение.

При подборе сечений элементов важным этапом является внутренняя оптимизация сечений ($EI_i, EA_i \rightarrow \text{opt}$), то есть принимается оптимальная форма сечений с учетом характера работы и назначается минимально возможная площадь сечений.

4. Статический расчет системы с определением внутренних усилий и деформаций.

5. Определение усилий предварительного напряжения или монтажных зазоров в затяжке и надколонниках (P_4, P_5 или Δ_4, Δ_5) [1].

6. Проверка расчетных сечений (рис. 3б) элементов системы по предельным состояниям.

В рамках теоретического исследования новой конструкции решалась задача получения рациональной конструкции с оптимальными параметрами, в качестве критерия оптимальности рассматривался вес конструкции $y(x) = G(x) = \sum_{i=1}^n G_i(x)$.

Решалась задача параметрической условной оптимизации [2]. Для исследования n -факторного пространства были применены методы теории планирования экспериментов, адаптированные к проектированию строительных конструкций М.Б. Краковским (1973). Методы позволяют при минимальном числе опытов определить степень и характер влияния отдельных факторов на изменение целевой функции.

В качестве параметров оптимизации рассматривались: высота конструкции h , м; угол наклона подкоса α , град.; соотношение жесткостей балки на опоре и в пролете I_2/I_1 ; предварительное напряжение в надколонниках P_4 и затяжке P_5 и коэффициент доли пролетного момента от балочного $\mu=M_{sp}/M_0$. Установлено, что параметры I_2/I_1 , P_4 , P_5 не являются активными. Параметры h , α и μ являются активными: $h_{opt}=h_{max}=l/8$, $\alpha_{opt}=\alpha_{min}=25^\circ$ (по конструктивным ограничениям), $\mu_{opt}=M_{sp}/M_0=0,2\div 0,3$ (рис. 4).

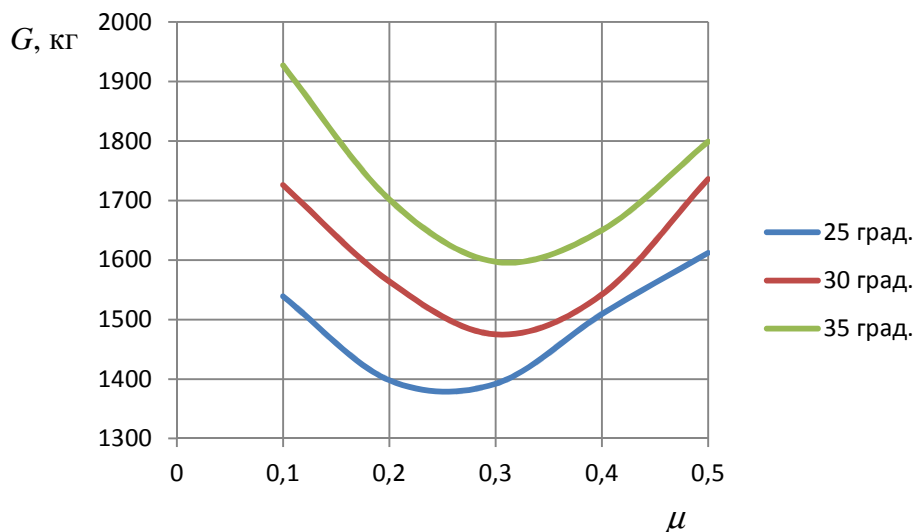


Рис. 4 – Зависимость веса конструкции G от параметра $\mu=M_{sp}/M_0$ и угла наклона подкоса

Для обоснования расчетной модели балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой выполнен анализ значимости факторов:

- геометрической нелинейности в адекватном описании работы системы;
- стадий монтажа, предварительного напряжения, испытаний ступенями нагружения и разгрузки;
- влияния поперечной силы на распределение силовых факторов в неразрезных балках.

КЭ-анализ проведен на примере конструкции балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетом 18 м. Сечения элементов конструкции приняты согласно разработанному алгоритму расчета при заданном соотношении моментов $\mu=M_{sp}/M_0=0,25$. Предварительное напряжение элементов балки для регулирования моментов принято способом смыкания монтажных зазоров в затяжке и надколонниках: $\Delta_4=2,0$ см, $\Delta_5=1,2$ см. Нагрузка на балку передается через прогоны, установленные с шагом 3 м.

Выполнены расчеты в линейной и геометрически нелинейной постановках на нагрузку в виде системы сосредоточенных сил и эквивалентную равномерно распределенную, а также с учетом стадий монтажа. Сравнения результатов расчета вариантов моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчета

Сечение Усилия	Линейный расчет			Геометрически нелинейный расчет			Сравнение расчетов при типе нагрузки $F, \Delta, \%$
	при типе нагружения			при типе нагружения			
	системой сил F	распределенной нагрузкой q	$\Delta_{\text{лин}},$ %	системой сил F	распределенной нагрузкой q	$\Delta_{\text{нелин}},$ %	
1-1							
$M, \text{кН}\cdot\text{м}$	89,0	78,1	14,0	93,4	80,3	16,3	4,9
$N, \text{кН}$	-468,3	-477,1	-1,8	-468,2	-477,8	-2,0	0,0
2-2							
$M, \text{кН}\cdot\text{м}$	-236,6	-242,8	-2,6	-239,9	-243,3	-1,4	1,4
$N, \text{кН}$	-471,9	-480,3	-1,7	-471,8	-483,9	-2,5	0,0
$Q, \text{кН}$	105,1	133,0	-21,0	104,6	131,6	-20,5	0,5
2'-2'							
$M, \text{кН}\cdot\text{м}$	-236,6	-242,8	-2,6	-239,9	-243,3	-1,4	1,4
$N, \text{кН}$	2,5	2,1	19,0	2,8	2,4	19,0	12,0
$Q, \text{кН}$	-140,9	-117,8	19,6	-141,8	-118,9	19,3	0,6
3-3							
$N, \text{кН}$	-535,3	-545,5	-1,9	-536,1	-548,2	-2,2	0,1
5-5							
$N, \text{кН}$	470,2	476,8	-1,4	469,9	480,5	-2,2	0,0

Сопоставление результатов расчетов показало существенное влияние поперечных сил на распределение силовых факторов в конструкции ($\Delta > 10\%$) и несущественное влияние геометрической нелинейности ($\Delta < 10\%$).

Моделирование процесса монтажа, предварительного напряжения, испытаний ступенями нагружения и разгрузки показало 100%-ное совпадение результатов с линейным расчетом. Коэффициент запаса общей устойчивости системы составил 1,6.

Натурные испытания стропильных балочных конструкций покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м проводились в соответствии с предварительно разработанной Программой и методикой испытаний на объекте строительства в г. Тюмени [6]. Испытанию подвергалась трехпролетная рама 18-24-18 м в составе каркаса здания (рис. 5).

Экспериментальные исследования показали, что картина деформаций (перемещения и прогибы) балочных конструкций покрытия переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м на стадии предварительного напряжения и ступенях нагружения полностью соответствует расчетным данным.



Рис. 5 – Натурные испытания конструкций нагружением с контролем относительных деформаций (тензометрические преобразователи) и перемещений (шкаловые марки)

Значения напряжений не превысили контрольных значений, расхождения по максимальным значениям составили до 30% в запас прочности материала. Расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями вертикальных деформаций составили до 28% в запас жесткости. Построенные зависимости «нагрузка – вертикальные перемещения» подтверждают упругий характер работы конструкций.

Эффективность применения новой конструкции покрытия показана на примере блока здания размерами 60×108 м в сравнении с вариантом каркаса типа «Молодечно», выбранного в качестве исходного варианта среди других типовых ЛМК по эффективным показателям расхода металла, трудоемкости изготовления и монтажа [5]. По результатам экономического расчета новые конструкции легче на 3,5%; снижены трудоемкость изготовления на 39% и транспортные расходы на 68%.

Новые конструкции покрытия пролетами 18 и 24 м внедрены при строительстве здания гипермаркета площадью 22,5 тыс. м², получен эффект от внедрения в размере 7,6% от стоимости каркаса здания.

Выводы

1. Разработана новая конструкция покрытия в виде балки переменной жесткости с подкосами и затяжкой (патент № 2361982 РФ). Получен эффект от внедрения.

2. На основании сравнения результатов линейного и нелинейного расчетов ($\Delta < 10\%$) обосновано применение расчетной модели конструкции в линейной постановке.
3. Сопоставление результатов расчетов конструкции на нагрузку в виде системы сосредоточенных сил и эквивалентную равномерно распределенную показало существенное влияние поперечных сил на распределение силовых факторов в конструкции ($\Delta > 10\%$).
4. Установлены активные параметры оптимизации конструкции (h , α и μ) и их значения, соответствующие минимуму веса.
5. На основе результатов натурных испытаний балок переменной жесткости с подкосами и затяжкой пролетами 18 и 24 м в составе трехпролетного покрытия выявлено, что деформированное состояние конструкций при выполнении предварительного напряжения балок и на этапах нагружения соответствует расчетным данным.

Список литературы

1. Корсун Н.Д. Определение оптимального усилия предварительного напряжения стальной балочной конструкции // Эффективные строительные конструкции: теория и практика : сб. статей X Международной научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2010. – 224 с. – С. 95-98.
2. Корсун Н.Д. Определение оптимальных параметров новой металлической конструкции покрытия : сб. материалов Всероссийской НПК «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». – Тюмень, 2010. – С. 106-108.
3. Москалев Н.С., Пронозин Я.А., Корсун Н.Д. Инновационные технологии в проектировании легких металлических конструкций // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2007. - № 1. – С. 8-11.
4. Пронозин Я.А., Бай В.Ф., Корсун Н.Д., Еренчинов С.А., Зазуля Ю.В. Металлическая несущая конструкция покрытия : Патент № 2361982 Рос. Федерация: МПК E04B 7/00. 20.07.2009, Бюл. № 20.
5. Пронозин Я.А., Корсун Н.Д. Опыт разработки и внедрения новой металлической конструкции покрытия : сб. науч. тр. Междунар. симпозиума «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)». – Брест : ОАО «Брестская типография», 2009. – С. 259-264.
6. Пронозин Я.А., Корсун Н.Д., Еренчинов С.А. Экспериментальные исследования стальной балочной конструкции переменной жесткости с подкосами и затяжкой // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 3 (11). – С. 29-34.

7. Стальные конструкции легких зданий / Н.С. Москалев, Р.А. Попова. – М. : АСВ, 2003. - 216 с.

Рецензенты:

Миронов В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», г. Тюмень.

Чекардовский М.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», г. Тюмень.