

Мирон ГОГОЛЬ, Беата ОРДОН-БЕСКА
Национальный университет «Львовская политехника», Украина
Честновский Политехнический Институт, Польша

СНИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье рассмотрены вопросы расчетного обоснования рациональных геометрических параметров комбинированных металлических конструкций с пониженной энергоемкостью за счет минимизации расхода металла

Ключевые слова: комбинированные металлические конструкции, промежуточные опоры, рациональное проектирование

ВВЕДЕНИЕ

Капитальное строительство является одной из наиболее материалоемких отраслей народного хозяйства и ежегодно потребляет около одной трети общего объема металлопродукции черных металлов. При расходовании на нужды капитального строительства огромных объемов материальных ресурсов повышение эффективности их использования приобретает особо важный характер и становится проблемой стратегического значения.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из направлений повышения эффективности в области строительства является разработка и совершенствование новых прогрессивных конструктивных форм, позволяющих снизить расход материалов, трудоемкость изготовления и монтажа, стоимость. К ним относятся различные комбинированные системы. Комбинированные системы включают в себя структурно объединенные растянутые элементы (затяжки, подкосы, ванты) и основной несущий элемент, работающий на сжатие и изгиб - балку жесткости.

Анализ существующего опыта проектирования и строительства показал, что по сравнению с традиционными балочными и рамными конструкциями, комбинированные системы имеют ряд преимуществ [1-4]. Одновременно основным их недостатком является использование предварительного напряжения [5, 6]. Объем их применения невелик, что определяется рядом факторов, в том числе отсутствием рекомендаций по конструированию и расчету, обеспечивающих высокую надежность и экономичность конструкций.

2. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проведено обзор литературы и последних исследований в области материалоёмкости комбинированных металлических конструкций.

2.1. Анализ исследований и публикаций

В последнее время проектировщики все чаще отказываются от предварительного напряжения путем замены его расчетным перераспределением усилий и регулированием напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций [6]. Прежде всего речь идет о варьировании геометрических и жесткостных характеристик сечений элементов, геометрических и топологических характеристик систем и параметров граничных условий. Такие приемы позволяют уменьшать расчетные усилия в одних элементах (сечениях) конструкции за счет увеличения усилий в других элементах (сечениях) и проектировать равнонапряженные конструкции, как наиболее рациональные системы, в результате достигая того же эффекта, как и от предварительного напряжения [5]. Однако технология предварительного напряжения является энергозатратной, кроме того она вызывает повышение трудоемкости и стоимости изготовления конструкций и их эксплуатации, что приводит к существенному ограничению его использования в практике строительства.

Поскольку принципиальных технологических ограничений по регулированию НДС в комбинированных металлических конструкциях не существует, то особую важность приобретает задача рационального их расчета и проектирования. Рациональное проектирование, которое, в отличие от оптимального, не предусматривает существования какого-либо целевого функционала, а выражается в эвристических требованиях к напряженно-деформированному состоянию (НДС) конструкции (равнопрочность, равнонапряженность, равномерность, максимальная жесткость, или минимальная масса), что гарантирует улучшение ее качеств наиболее естественным прочностным критерием рационального проектирования. При этом несущая способность конструкции используется наиболее полно. Поставленной проблеме в наибольшей мере отвечают комбинированные (шпренгельные, вантовые, висячие) конструкции, основным рабочим элементом которых является балка жесткости. Именно условия проектирования балки жесткости предоставляют возможность регулирования усилий во всей системе. Выравнивание величин расчетных напряжений и увеличения количества расчетных сечений в балке жесткости позволит уменьшить поперечное сечение балки и повысить эффективность таких конструкций без дополнительных материальных затрат. Таким образом расчетный метод регулирования НДС является наиболее рациональным [4-6].

Раскрытие потенциала регулирования, который присущий таким комбинированным системам путем рационального формирования НДС в сечениях конструкции уже на стадии проектирования, создает рациональные основания для разработки научных основ получения конструкций нового поколения.

2.2. Цель работы

Целью работы является расчетное обоснование выбора рациональных геометрических параметров комбинированных металлических конструкций для минимизации расхода металла.

3. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Предложенный метод проектирования и расчета рациональных комбинированных металлических конструкций сводится к учету влияния деформативности промежуточных опор балки жесткости на соотношение опорных и пролетных моментов [5].

Это вызывает необходимость разработки методологии выбора рациональных геометрических параметров комбинированных металлических конструкций. Для расчета рациональных комбинированных металлических конструкций предложено единую расчетную модель комбинированных систем (на основе метода декомпозиции системы) в виде балки на упругих опорах, в которой балка моделирует балку жесткости, а упругие опоры - систему подкрепления [6]. Чтоб расчетная модель была способна решить поставленную задачу, нужно выяснить, какое минимальное количество элементов подкрепления, т.е. упругих опор, способно создать в балке жесткости максимальное количество расчетных сечений.

3.1. Поиск рационального количества опор балки жесткости

Для этого применим понятие потенциальной энергии деформации систем, элементы которых работают только на изгиб [3]. Для таких систем энергию деформации U определяем по формуле:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} \frac{M_x^2}{EI} dx \quad (1)$$

где: l_i - длина элемента i ; n - количество элементов.

С помощью воображаемого моделирования полиэкстремальную эпюру M_x балки жесткости можем подать, как равноэкстремальную, в которой длины элементов l_i определяют по формуле:

$$l_i = \frac{l}{n} \quad (i = \overline{1, n}) \quad (2)$$

Для балки пролетом l на двух опорах, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q , эпюра M_x описывается аналитической зависимостью:

$$M_x = \frac{1}{2} qx(1-x) \quad (3)$$

а для равноэкстремальной эпюры М:

$$M_x = \frac{1}{2}qx_1(l_i - x_1) - \frac{ql_i^2}{16} \quad (i = \overline{1, n}) \quad (4)$$

Подставив в формулу (1) зависимость (3), для балки получим

$$U_6 = \frac{1}{2EI} \int_0^l \frac{1}{4} q^2 x^2 (l-x)^2 dx \quad (5)$$

Подставив в формулу (1) зависимость (4), для балки с равноэкстремальной эпюрой М, получим:

$$U \cong \frac{nq^2 l_i^5}{1113EI} \quad (6)$$

Для удобства сравнения формул (5) и (6) подставим в формулу (6) значения l_i с формулы (2), тогда получим:

$$U = \frac{q^2 l_i^5}{1113n^4 EI} \quad (7)$$

Подставив энергию деформации обычной балки, полученную по формуле (5), в формулу (7), получим:

$$U \cong \frac{U_6}{4,6n^4} \quad (8)$$

На основе формулы (8) можем записать:

$$\lim U = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{U_6}{4,6n^4} = 0 \quad (9)$$

Следовательно, с ростом числа n пролетов неразрезной балки жесткости до бесконечности, энергия деформации такой балки уменьшается до нуля, то есть балка превращается в жесткий стержень на твердой основе, в котором отсутствуют деформации изгиба.

Сравнивая массу m_c для шарнирно опертой балки на двух жестких крайних опорах с моноэкстремальной эпюре моментов с массой неразрезной балки m_σ , получим:

$$m_c = \frac{m_6}{2n^2} \quad (10)$$

Отсюда можно сделать вывод: промежуточные упругие опоры в балке на двух опорах меняют балку качественно: она превращается из такой, в которой доминирующей есть ее деформация, в такую, в которой доминирует ее проч-

ность. Для большей наглядности функцию (10) изобразим графически, где принято массу однопролетной балки $m_6 = 2500$ кг (рис. 1).

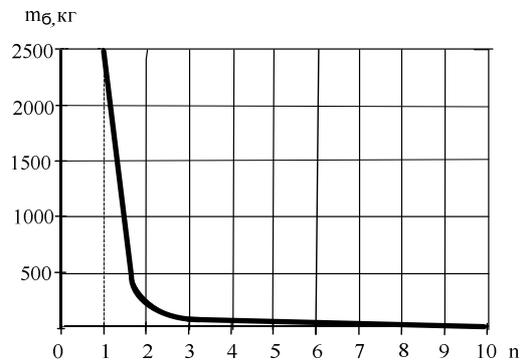


Рис. 1. Изменение массы m_6 пролета неразрезной балки на упругих опорах от количества пролетов n

Из графика ясно, что масса пролета балки на двух опорах при трансформации ее в неразрезную балку с n -м количеством пролетов и соответственно эпюры M_x с моноэкстремальной в равноэкстремальную с помощью промежуточных упругих опор, интенсивно уменьшается только в количестве пролетов $n \leq 4$.

3.2. Определение рациональных углов наклона подкосов, тяжей и вант комбинированных конструкций

Рассмотрим работу комбинированной шпренгельной балки только равномерно распределенную нагрузку q (рис. 2).

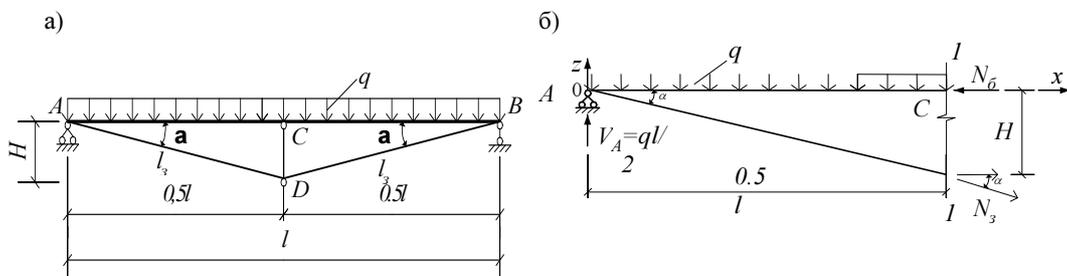


Рис. 2. Комбинированная шпренгельная балки: а) расчетная модель; б) схема равновесия конструкции

На основе равновесия половины конструкции (рис. 2а) - определим усилия в затяжке N_3 и балке жесткости N_6 , получим:

$$N_6 = N_3 \cos \alpha \Rightarrow N_6 = \frac{ql}{4} \operatorname{ctg} \alpha \quad (11)$$

Из этих зависимостей понятно, что усилия в затяжке N_3 могут меняться, в зависимости от величины α , от значений $ql/4$, когда $\alpha = 90^\circ$, до ∞ , когда $\alpha = 0$.

Следовательно, значение угла α очень влияет на размер массы системы. С формулы (11) видно, что при $\alpha = 0^\circ$ значение N_6 также становится бесконечным. Но угол α влияет не только на значение N_3 и N_6 , но и на длину стояка и тяжей. С рисунка 2 очевидно, что:

$$l_3 = \frac{1}{2 \cos \alpha} \quad (12)$$

К тому же:

$$A_3 = \frac{N_3}{\gamma_c R_y} = \frac{ql}{4\gamma_c R_y \sin \alpha} \quad (13)$$

Масса затяжки m_3 составит

$$m_3 = l_3 A_3 = \frac{ql^2}{4\gamma_c R_y \sin 2\alpha} \quad (14)$$

С формулы (14) очевидно, что $m_3 \rightarrow \min$, когда $\sin 2\alpha \rightarrow \max$, то есть когда $\alpha = 45^\circ$. Для большей наглядности функцию (14) изобразим графически (рис. 3) в системе координат $m_3 - \alpha^\circ$, приняв условно массу затяжки при $\alpha = 45^\circ$ за единицу.

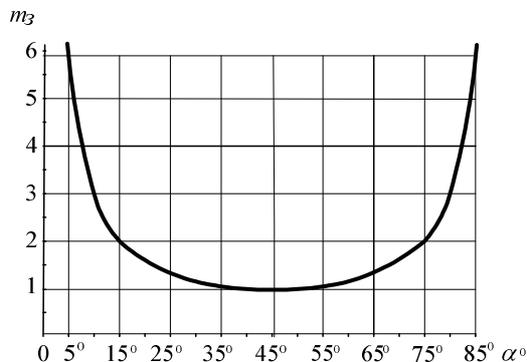


Рис. 3. Зависимость массы затяжки m_3 шпренгельной балки от угла α

Как видно из рисунка 3, масса затяжки при $\alpha = 15^\circ$, а также $\alpha = 75^\circ$ в два раза больше, чем при $\alpha = 45^\circ$. А при $\alpha = 10^\circ$ и $\alpha = 80^\circ$ она почти втрое больше, чем при $\alpha = 45^\circ$. При $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$ масса затяжки будет больше, чем при $\alpha = 45^\circ$, всего на $\sim 15\%$, что можно допустить. Итак, из условий влияния на стоимость здания угол α одностойчатой шпренгельной балки не должен превосходить $\sim 14\%$, тогда высота H соответствовать высоте фермы.

Отсюда следует, что угол α никак не влияет на эпюру M_x в балке жесткости, а лишь на значение нормальной силы в ней, которая определяется по формуле (11). Очевидно, что минимальное значение N_b и определит мини-мальную массу балки жесткости. Поэтому выгодный для шпренгельной системы угол α будет определяющим и для балки жесткости, а именно $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$. Но из условий стоимости здания приемлемым лишь $\alpha \approx 30^\circ$. Все приведенное о массе m , затяжки (тяжа) правомерно и для других типов комбинированных конструкций.

3.3. Поиск рациональной высоты

Эффективность работы комбинированной фермы - балко-фермы (балки шпренгельного типа) при симметричной нагрузке приведена в [7]. Следовательно, при высоте фермы $H = 1/10$ балко-ферма работает одинаково при полном временном нагрузке по всей длине балко-фермы и при односторонней нагрузке. Разница напряжений в наиболее невыгодном сечении составляет всего 0,6% [7].

На основе проведенных исследований видно, что при больших значениях «Н» балко-ферма при одностороннем временной нагрузке работать хуже, чем при полном временном нагрузке по всей длине балко-фермы. Следовательно, регулирование усилий в элементах балко-фермы при $H > 1/10$ становится менее эффективным. А при $H \leq 1/10$ разработанная нами методика является эффективной - проводить расчет балко-фермы на одностороннее временную нагрузку не нужно.

Комбинированные металлические малоэлементные шпренгельные фермы пролетом 18 м с рациональными геометрическими параметрами и расчетным регулированием НДС были использованы на строительстве 5-звездочного санаторно-гостиничного комплекса Royal Hotels&SPA Resort, корпус «Женева» в г. Трускавец Львовской области (рис. 4).



Рис. 4. Малоэлементни шпренгельные фермы пролетом $L = 18$ м. Комплекс Royal Hotels & SPA Resort, корпус «Женева» в г. Трускавец, Львовской обл., 2007 г.

Результаты их использования показали высокую эффективность предложенных комбинированных металлических конструкций.

Аналогичные результаты были получены при строительстве бизнес-центра «Лемберг» (г. Львов, 2007 г.), Львовском заводе экспериментальных механических испытаний (г. Львов, 2004 г.), завод «Карпатская керамика» (г. Калуш, Ивано-Франковская обл., 2011 г.) и физкультурно-оздоровительного комплекса (г. Львов, ул. Зубровская, 2012 г.).

ВЫВОДЫ

Доказано, что масса неразрезной балки жесткости на промежуточных упругих опорах, по сравнению с балкой на двух опорах, интенсивно уменьшается при наличии не более трех опор. Определены рациональные углы наклона подкосов, тяжей и вант комбинированных конструкций по отношению к их массе в диапазоне $30\div 60^\circ$. На примере малоэлементной комбинированной шпренгельной фермы, установлено, что при соотношении ее высоты к пролету $1/10$ и более, достаточным является расчет только на симметричное нагружение.

Использование комбинированных металлических систем с расчетным регулированием НДС обеспечивает проектирование рациональных конструкций как по расходу металла, так и по их энергоемкости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lubinski M., Filipowicz A., Zoltowski W., Konstrukcje metalowe. Część 1, Arkady, Warszawa 2003, 646 с.
- [2] Lubinski M., Zoltowski W., Konstrukcje metalowe. Część 2, Arkady, Warszawa 2004, 566 с.
- [3] Металеві конструкції, [В.О. Пермяков, А.А. Нілов, О.В. Шимановський і інш.]; під ред. В.О. Пермякова і О.В. Шимановського, Видавництво «Сталь», К.: 2008, 812 с.
- [4] Gogol, Miron. Shaping of effective steel structures, Budownictwo i inzynieria środowiska: zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszow 2009, № 264, z. 52, s. 43-56.
- [5] Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій: навч. Посібник, [В.О. Пермяков, М.В. Гоголь, І.Д. Пелешко, М.Р. Більський, Б.С. Чайка]; за ред. проф. В.О. Пермякова, Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, Львів 2005, 180 с.
- [6] Гоголь М.В., Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих конструкцій, М.В. Гоголь, Металеві конструкції 2008, Том 14, № 4, с. 253-262.
- [7] Гоголь М.В., Особливості роботи балко-ферм при несиметричному навантаженні, Теорія і практика будівництва: вісник нац. ун-ту “Львівська політехніка”, Львів 2007, № 600, с. 63-67.
- [8] Advances in steel structures: Proceedings of the Fourth international Conference 13-15 June 2005 in Shanghai, China, Edited by Z.Y. Shen, G.Q. Li, Q.L. Zhang, Elsevier, Amsterdam-London 2005, 918 с.

REDUCTION OF MATERIAL CONSUMPTION OF COMBINED METAL STRUCTURES

The paper deals with the design of rational justification of the geometric parameters of combined metal structures with lower energy capacity due to minimization of material consumption.

Keywords: combined metal structures, the intermediate supports, rational design