



РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОМБІНОВАНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

М. В. Гоголь

Національний університет «Львівська політехніка»,

12, вул. Ст. Бандери, м. Львів, Україна, 79013.

E-mail: gogolmyron@i.ua

Отримана 12 березня 2014; прийнята 28 березня 2014.

Анотація. В статті розглянуто питання розрахункового обґрунтування вибору раціональних геометричних параметрів комбінованих металевих конструкцій та аналіз результатів виконаних досліджень. Застосування таких конструкцій відкриває широкі можливості для створення покриттів, що відрізняються легкістю, високими техніко-економічними показниками, архітектурною виразністю. Використання розрахункового методу регулювання НДС в комбінованих металевих конструкціях забезпечує рівність напружень в розрахункових поперечних перерізах балки жорсткості. Показано, що раціональність комбінованої конструкції в цілому залежить як від жорсткості проміжних опор підтримуючої системи, так і від топології. Доведено, що маса нерозрізної балки жорсткості на проміжних пружних опорах, порівняно з балкою на двох опорах прольотом до 60 м, інтенсивно зменшується при наявності не більше трьох опор. Визначено раціональні кути нахилу підкосів, тяжів і вант комбінованих конструкцій по відношенню до їх маси в діапазоні 30–60°. Результати досліджень впроваджено в практику будівництва, в результаті чого був отриманий економічний ефект 6 118 тис. грн.

Ключові слова: раціональні комбіновані конструкції, рівнонапруженість, проміжні опори, регулювання, раціональні кути.

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

М. В. Гоголь

Национальный университет «Львовская политехника»,

12, ул. Ст. Бандеры, г. Львов, Украина, 79013.

E-mail: gogolmyron@i.ua

Получена 12 марта 2014; принята 28 марта 2014.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы расчетного обоснования выбора рациональных геометрических параметров комбинированных металлических конструкций и анализ результатов выполненных исследований. Применение таких конструкций открывает широкие возможности для создания покрытий, отличающихся легкостью, высокими технико-экономическими показателями, архитектурной выразительностью. Использование расчетного метода регулирования НДС в комбинированных металлических конструкциях обеспечивает равенство напряжений в расчетных поперечных сечениях балки жесткости. Показано, что рациональность комбинированной конструкции в целом зависит как от жесткости промежуточных опор поддерживающей системы, так и от топологии. Доказано, что масса неразрезной балки жесткости на промежуточных упругих опорах, по сравнению с балкой на двух опорах пролетом до 60 м, 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 30–60°. Результаты исследований внедрены в практику строительства, в результате чего был получен экономический эффект 6 118 тыс. грн.

Ключевые слова: рациональные комбинированные конструкции, равнонапряженность, промежуточные опоры, регулирование, рациональные углы.

CALCULATION AND RATIONAL DESIGN COMBINED METAL STRUCTURES

Myron Gogol

National University «Lviv Politechnique»,

12, Str. Bandery, Lviv, Ukraine, 79013.

E-mail: gogolmyron@i.ua

Received 12 March 2014; accepted 28 March 2014.

Abstract. The article deals with the issue of rational choice study estimated geometrical parameters of the combined metal structures and analysis of the results of research. The use of these structures presents a major opportunity to create surfaces that are easy, high technical-economic indicators, architectural expression. Using the calculation method of adjustment of SDS combined metal construction ensures equality of stresses in the calculated cross section of the beam stiffness. It is shown that rational combination design as a whole depends on the stiffness of the suspension towers supporting system and the topology. It is proved that the mass of continuous beam stiffness at intermediate elastic supports, compared with a beam on two supports to span 60 m, rapidly decreases in the presence of up to three towers. Rational angles podkoso, strands and cables composite structures relative to their weight in the range of 30–60°. The research results are put into practice building, bringing economic benefit was obtained 6 118 thousand uah.

Keywords: rational combination design, equi-stress, suspension towers, regulation, rational angles.

Постановка проблеми і її актуальність

Сучасний розвиток будівельної науки і техніки веде до вдосконалення існуючих і створення нових будівельних конструкцій. Одним з напрямків підвищення ефективності в галузі будівництва є розробка та вдосконалення нових прогресивних конструктивних форм, що дозволяють знизити витрату матеріалів, трудомісткість виготовлення і монтажу, вартість. До них відносяться різноманітні комбіновані системи. Комбіновані системи включають в себе структурно об'єднані розтягнуті елементи (затяжки, підкоси, ванти) і основний несучий елемент, що працює на стиск і вигин – балку жорсткості (маса її досягає до 70 % загальної маси) і від металоємності якої в значній мірі залежать техніко-економічні показники всієї системи.

Застосування таких конструкцій відкриває широкі можливості для створення покриттів, що відрізняються легкістю, високими техніко-економічними показниками, архітектурною виразністю [4]. Аналіз існуючого досвіду проектування та будівництва показав, що в порівнянні з традиційними балочними і рамними конструкціями, комбіновані системи мають ряд переваг [3, 9, 14, 15, 21]. Водночас, основним їх недоліком

є використання попереднього напруження [10]. Обсяг їх застосування в нашій країні невеликий, що визначається рядом факторів, у тому числі відсутністю детальних теоретичних і експериментальних досліджень їх дійсної роботи, рекомендацій з конструювання і розрахунку, що забезпечують високу надійність і економічність конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом проектувальники все частіше відмовляються від попереднього напруження шляхом заміни його розрахунковим перерозподілом зусиль і регулюванням напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, ідея якого полягає в забезпеченні заздалегідь вибраного раціонального розподілу зусиль в елементах шляхом адаптації параметрів конструкції до визначеного кінцевого результату [19, 20]. Насамперед йдеться про варіювання геометричних і жорсткісних характеристик перерізів елементів, геометричних і топологічних характеристик систем і параметрів граничних умов. Такі прийоми дозволяють зменшувати розрахункові зусилля в одних елементах (перерізах) конструкції за

рахунок збільшення зусиль в інших елементах (перерізах) і проектувати рівнонапружені конструкції як найбільш раціональні системи, в результаті досягати того ж ефекту, як і від попереднього напруження [8, 13]. Однак технологія попереднього напруження є енергозатратною, крім того, вона спричиняє підвищення працездатності та вартості виготовлення конструкцій і їх експлуатації, що призводить до суттєвого обмеження її використання в практиці будівництва.

Оскільки принципів технологічних обмежень з регулювання НДС в комбінованих металевих конструкціях не існує, то особливої ваги набуває завдання оптимального і раціонального їх розрахунку і проектування. Проблема оптимального проектування комбінованих металевих конструкцій у повному своєму обсязі надзвичайно складна і в ряді випадків не має закінченого, строгого математичного формулювання. Крім того, існуючі на сьогоднішній день методи вирішення таких завдань не гарантують досягнення глобального екстремуму цільового функціонала, і тому одержані рішення можна вважати оптимальними лише умовно [23].

Альтернативою оптимальному проектуванню служить раціональне проектування, яке, на відміну від оптимального, не передбачає існування якого-небудь цільового функціонала, а виражається в додаткових евристичних вимогах до напружено-деформованого стану (НДС) конструкції (рівноміцність, рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість, або мінімальна маса), що гарантує покращення її якостей найбільш природним міцнісним критерієм раціонального проектування. При цьому несуча здатність конструкції використовується найбільш повно. Тому особливої актуальності набуває розробка теорії і методів розрахунку рівнонапружених – раціональних комбінованих металевих конструкцій з урахуванням реальних особливостей їх роботи. Отже, раціональна комбінована металева конструкція – це така конструкція, в якій під дією навантаження в балці жорсткості по її довжині забезпечується рівнонапружений стан у розрахункових опорних і прольотних перерізах.

Поставленій проблемі в найбільшій мірі відповідають комбіновані (шпренгельні, вантові, висячі) конструкції, основним робочим елементом яких є балка жорсткості. Саме умови проек-

тування балки жорсткості надають можливість регулювання зусиль у всій системі. Вирівнювання величин розрахункових напружень і збільшення кількості розрахункових перерізів в балці жорсткості дасть можливість зменшити поперечний переріз балки і підвищити ефективність таких конструкцій без додаткових матеріальних затрат. Таким чином, розрахунковий метод регулювання НДС є найбільш раціональним [12, 17, 18]. Проблема розрахунку раціональних будівельних конструкцій, в тому числі комбінованих, зводиться до розрахункового регулювання їх НДС і насамперед ставиться як проблема їх раціонального проектування.

Регулювання зусиль в металевих балках суцільного перерізу найбільш доцільно проводити перетворенням їх в нерозрізні [2, 16], що дає суттєве зменшення згинальних моментів. Але результати таких розрахунків дають нерівномірний напружений стан по довжині основного елемента – балки жорсткості, який полягає у суттєвій різниці опорних і прольотних моментів. Це робить такі комбіновані конструкції не завжди раціональними [6, 7]. Використання розрахункового методу регулювання НДС в комбінованих металевих конструкціях забезпечує рівність напружень в розрахункових поперечних перерізах. Розкриття потенціалу регулювання, який присутній таким комбінованим системам шляхом раціонального формування НДС в перерізах конструкції вже на стадії проектування, створює раціональні підстави для розробки наукових основ одержання конструкцій нової генерації. Цей принцип використаний в комбінованих конструкціях (шпренгельних балках, балкофермах, вантових та висячих системах).

Мета роботи

Метою роботи є розрахункове обґрунтування вибору раціональних геометричних параметрів комбінованих металевих конструкцій та аналіз результатів виконаних досліджень.

Виклад основного матеріалу

Запропонований метод проектування і розрахунку раціональних комбінованих металевих конструкцій зводиться до врахування впливу

деформативності проміжних опор балки жорсткості на співвідношення опорних і прольотних моментів [8].

Наприклад, якщо в однопрольотній балці маємо моноекстремальну епюру M_x із значенням екстремуму $M_c = ql^2/8$ вертикального переміщення перерізу посередині, то, поставивши посередині прольоту жорстку опору, одержимо три екстремуми в епюрі M_x але різного значення – $ql^2/32$ на опорі $ql^2/64$ в кожному прольоті. При цьому у середній опорі виникне реакція $R_c = 5/8ql$, але осідання опори не буде, тобто $\Delta_c = 0$. Якщо поставити не жорстку, а пружну опору таку, щоб $M_c = 0$, то інші два екстремуми в епюрі M_x матимуть значення $ql^2/32$, а пружна опора осяде на величину $\Delta_c = 1,25ql^4/480EI$, реакція в ній матиме значення $R_c = ql/2$, тобто зменшиться всього на 12,5 % проти реакції у жорсткій опорі. Щоб одержати рівноекстремальну епюру M_x , необхідно так змінити $R_c = k\Delta_c = f(q, I, E, I, A)$ – жорсткість пружної опори, щоб всі екстремуми мали значення $ql^2/48$. Таким чином, при регулюванні зусиль у балці потрібно одночасно регулювати значення реакції і осідання пружної опори, що характеризує зміну жорсткості системи – адже на осідання пружної опори впливає не лише її жорсткість, але й жорсткість самої балки. А жорсткість пружній опорі надає система підкріплення балки жорсткості.

Таким чином, суть регулювання НДС системи полягає у такому підборі жорсткості елементів системи, яка дозволить у її деформованому стані отримати бажаний розподіл зусиль і деформацій.

Отже, максимальну економію, яку можна досягнути при розрахунковому регулюванні НДС (пружністю проміжної опори) у нерозрізній балці, це одержати епюру, де $M_{max} = ql^2/48$, що на 34 % менше порівняно з балкою з жорсткою опорою (без регулювання НДС).

Комбіновані системи відрізняються великою свободою вибору вихідних параметрів: статичною схемою; прольотом; співвідношенням висоти і прольоту конструкції; розташуванням і кількістю додаткових стрижневих елементів (стійок, підвісок тощо); застосовуваними матеріалами; методами виготовлення і монтажу. Елементарні схеми різноманітними способами можуть об'єднуватися в складні. Сферою засто-

сування комбінованих систем є покриття прольотом 6–60 м в будівлях і спорудах різного призначення. Це викликає необхідність розробки методології вибору раціональних геометричних параметрів комбінованих металевих конструкцій.

Одним з основних питань будівельної механіки споруд є вибір розрахункової схеми, адекватної розглянутій конструкції, що дозволяє отримати достовірні теоретичні результати. Для розрахунку раціональних комбінованих металевих конструкцій запропоновано єдину розрахункову модель комбінованих систем (на основі методу декомпозиції системи) у вигляді балки на пружних опорах (рис. 1а), в якій балка моделює балку жорсткості, а пружні опори – систему підкріплення [11]. Щоб узагальнена розрахункова модель була здатна вирішити поставлене завдання повністю, потрібно з'ясувати, яка мінімальна кількість елементів підкріплення, тобто пружних опор, здатна створити у балці жорсткості максимальну кількість розрахункових перерізів за одночасного забезпечення потрібної за нормами жорсткості системи та мінімальних технологічних затратах.

Пошук раціональної кількості опор балки жорсткості. Для цього застосуємо теорію подібності та моделювання і енергетичні принципи будівельної механіки, зокрема поняття потенційної енергії деформації систем, елементи яких працюють лише на згин [1]. Для таких систем енергію деформації « U » визначаємо за формулою:

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

де l_i – довжина елемента « i »; n – кількість елементів.

За допомогою уявного моделювання поліекстремальну епюру « M_x » балки жорсткості можемо подати як рівноекстремальну, в якій довжини елементів « l_i » визначають за формулою

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

Для балки прольотом « l » на двох опорах, навантаженої рівнорозподіленим навантаженням « q », епюра M_x описується аналітичною залежністю

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

а для рівноекстремальної епюри « M » така залежність матиме вигляд

$$M_x = \frac{1}{2} q x_i (l_i - x_i) - \frac{q l_i^2}{16} (i = \overline{1, n}). \quad (4)$$

Підставивши у формулу (1) залежність (3), для балки одержимо

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

Підставивши у формулу (1) залежність (4), для балки із рівноекстремальною епурою M , одержимо

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

Для зручності порівнювання формул (5) та (6) підставимо у формулу (6) значення l_i із формули (2). Тоді одержимо

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

Підставивши енергію деформації звичайної балки, одержану за формулою (5), у формулу (7), після перетворень одержимо

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

Одержано просту функціональну залежність між енергією деформації U_σ шарнірно опертої балки на двох жорстких крайніх опорах з моноекстремальною епурою моментів і енергією U , трансформованою з неї, нерозрізної балки на проміжних пружних опорах і рівноекстремальною епурою моментів залежно від кількості її прольотів – n . На основі формули (8) можемо записати

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

Отже, із зростанням кількості « n » прольотів нерозрізної балки жорсткості (що відповідає $n-1$ кількості її підкріплень вантами чи стояками шпренгельної системи) до нескінченності, енергія деформації такої балки зменшується до нуля, тобто балка перетворюється у жорсткий стержень на твердій основі, в якому відсутні деформації згину.

Наприклад, зміна маси прокатного двотаврового профілю « m_σ » від його W_x моменту опору описується аналітичною залежністю [19].

$$m_\sigma = A + C_m \cdot W_x, \quad (10)$$

де C_m – тангенс кута нахилу прямої до осі W_x ; $A = m_1$ – цією складовою нехтуємо.

Визначивши для згинального елемента значення W_x і підставивши у неї значення M_{max} із рівноекстремальної епюри M та маси нерозрізної балки « m_σ » із формули (10) одержимо масу « m_c » для шарнірно опертої балки на двох жорстких крайніх опорах з моноекстремальною епурою моментів

$$m_c = \frac{C_m q l^2}{16n^2 \gamma_c R_y}. \quad (11)$$

Для нерозрізної балки відповідно одержимо

$$\frac{m_\sigma}{C_m} = \frac{q l^2}{8\gamma_c R_y} \Rightarrow m_\sigma = \frac{C_m q l^2}{8\gamma_c R_y}. \quad (12)$$

Підставивши залежність (12) у вираз (11), матимемо

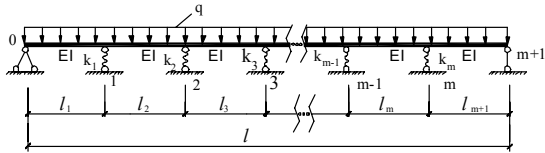
$$m_c = \frac{m_\sigma}{2n^2}. \quad (13)$$

Отже, із зростанням кількості прольотів « n » між крайніми опорами маса нерозрізної балки « m_σ » зменшується у квадратній залежності від кількості цих прольотів. Порівнюючи формули (8) та (13), доходимо висновку, що деформативність балки під час трансформації її епюри M_x із моноекстремальної у рівноекстремальну зменшується значно інтенсивніше, ніж зростає її міцність, а саме, деформативність зменшується у $\sim (2n)^2$ разів швидше, ніж зростає міцність балки. На основі вищесказаного можна зробити висновок: проміжні пружні опори у балці на двох опорах змінюють балку якісно: вона перетворюється із такої, в якій домінуючою є її деформація, у таку, в якій домінуючою є її міцність. Для більшої наочності функцію (13) зобразимо графічно, де прийнято масу однопрольотної балки $m_\sigma = 2\,500$ кг (рис. 16).

Із графіка зрозуміло, що маса прольоту балки на двох опорах під час трансформації її в нерозрізну балку з n -ю кількістю прольотів і відповідно епюри M_x із моноекстремальної у рівноекстремальну за допомогою проміжних пружних опор, інтенсивно зменшується лише до кількості прольотів $n \leq 4$, тобто за максимум три проміжних пружних опори. Інтенсивне зменшення маси балки жорсткості комбінованих конструкцій відбувається лише до трьох проміжних пружних опор. У разі більшої кількості таких опор маса балки зменшується повільно, тоді як кожна нова опора збільшує пропорційно масу підкріплювальної системи і додає до вартості

конструкції – вантової чи шпренгельної – і збільшує працёмісткість виготовлення і монтажу.

а)



б)

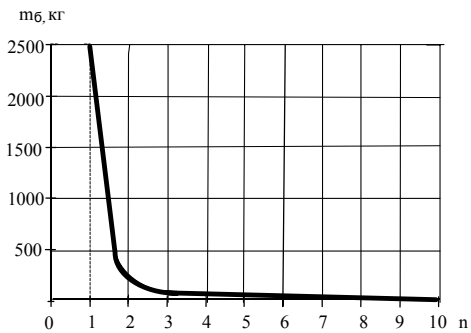


Рисунок 1. Розрахункова модель і графік зміни маси балки жорсткості: а) схема узагальненої розрахункової моделі балки жорсткості; б) зміна маси « m » прольоту нерозрізної балки на пружних опорах від кількості прольотів « n ».

Визначення раціональних кутів нахилу підкосів, тяжів і вант комбінованих конструкцій. Розглянемо роботу одностоякової шпренгельної балки лише рівнорозподілене навантаження « q » (рис. 2а).

На основі рівноваги половини конструкції (рис. 2б) – зрівноваження зовнішнього моменту внутрішнім, що виникне у системі від дії навантаження визначимо зусилля у зтяжці N_3

$$\sum M_{1-1} = 0 \Rightarrow N_3 = \frac{ql^2}{8H \cos \alpha}. \quad (14)$$

Зусилля у стояковій визначимо, висікши вузол «D»

$$\sum Z = 0 \Rightarrow N_c = 2N_3 \sin \alpha. \quad (15)$$

На основі схеми рис. 2б маємо

$$H = \frac{1}{2} l \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

Підставивши (16) у формулу (14), одержимо

$$N_3 = \frac{ql}{4 \sin \alpha}. \quad (17)$$

Підставивши вираз (14) у формулу (15), одержимо

$$N_c = \frac{ql}{2}. \quad (18)$$

На основі рис. 2б одержимо

$$N_o = N_3 \cos \alpha \Rightarrow N_o = \frac{ql}{4} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (19)$$

Із цих залежностей зрозуміло, що зусилля у зтяжці N_3 можуть змінюватися, залежно від величини « α », від значень $ql/4$, коли $\alpha=90^\circ$ до ∞ , коли $\alpha=0^\circ$. Отже, значення кута « α » дуже впливає на розмір маси системи. Із формули (19) бачимо, що при $\alpha=0^\circ$ значення N_o також стає безконечним. Але кут « α » впливає не лише на значення N_3 та N_o , але й на довжину стояка і тяжів. Із рис. 2б очевидно, що

$$l_3 = \frac{1}{2 \cos \alpha}. \quad (20)$$

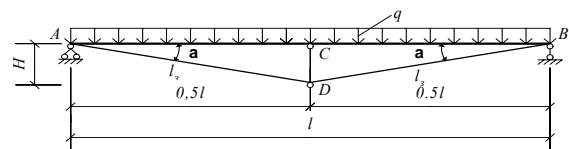
До того ж

$$A_3 = \frac{N_3}{\gamma_c R_y} = \frac{ql}{4\gamma_c R_y \sin \alpha}. \quad (21)$$

Маса зтяжки m_3 становитиме

$$m_3 = l_3 A_3 = \frac{ql^2}{4\gamma_c R_y \sin 2\alpha}. \quad (22)$$

а)



б)

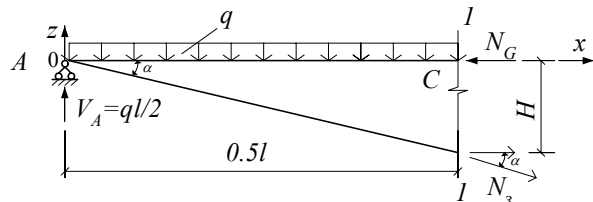


Рисунок 2. Розрахункові моделі: а) одностоякова шпренгельна балка; б) рівновага половини конструкції.

Із формули (22) очевидно, що $m_3 \rightarrow \min$, коли $\sin 2\alpha \rightarrow \max$, тобто, коли $\alpha=45^\circ$. Цей результат відповідає дослідженням [22], тільки там він

одержаний на основі теорії оптимізації. Але в обох випадках не враховано вартості будівлі, яка при $\alpha=45^\circ$ буде значно більшою, ніж за умови застосування замість шпренгельної балки ферми, чи, тим більше, прокатної балки, висоти яких становлять $H \leq l/8$, що відповідає куту $\alpha \cong 14^\circ$. Саме такий кут « α » прийнято у шпренгельному прогоні [5]. Для більшої наочності функцію (22) зобразимо графічно (рис. 3) у системі координат $m_3 - \alpha^\circ$, прийнявши умовно масу зтяжки при $\alpha=45^\circ$ за одиницю. Із графіка рис. 3 зрозуміло, що маса зтяжки при $\alpha=15^\circ$, а також $\alpha=75^\circ$ у два рази більша, ніж при $\alpha=45^\circ$. А при $\alpha=10^\circ$ і $\alpha=80^\circ$ вона майже втричі більша, ніж при $\alpha=45^\circ$. При $\alpha=30^\circ$ і $\alpha=60^\circ$ маса зтяжки буде більшою, ніж при $\alpha=45^\circ$, всього на ~15%, що можна допустити. Отже, з умов впливу на вартість будівлі кут « α » одностоякової шпренгельної балки не повинен перевершувати ~14%, тоді висота « H » відповідатиме висоті ферми.

Щоб визначити вплив значення « α » на роботу балки жорсткості, визначимо функціональну залежність M_x від « α ». На основі рис. 2б одержимо

$$M_x = \frac{qx}{4}(l - 2x). \quad (23)$$

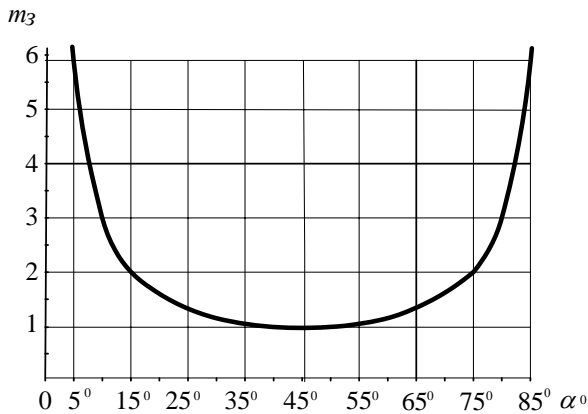


Рисунок 3. Залежність маси зтяжки m_3 одностоякової шпренгельної балки від кута « α ».

Як бачимо, кут « α » зовсім не впливає на епюру M_x у балці жорсткості, а лише на значення нормальної сили в ній, яку визначаємо за формулою (19). Очевидно, що мінімальне значення N_0 і визначатиме мінімальну масу балки жорсткості. Отже, для балки жорсткості найвигідні-

шим є $\alpha=90^\circ$, тобто відсутність шпренгеля, тоді $N_0=0$. Тому вигідний для шпренгельної системи кут « α » буде визначальним і для балки жорсткості, а саме $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$. Але з умов вартості будівлі прийнятним буде лише $\alpha \approx 30^\circ$.

Із формул (18) та (20) бачимо, що за відсутності деформації системи, на величини « N_0 » та M_x значення кута « α » не впливає зовсім. Визначимо за цих умов значення M_x при $x = l/2$. Отже, на основі формули (20), одержимо

$$M_{x=l/2} = \frac{q}{4} \frac{l}{2} (l - 2 \frac{l}{2}) = 0.$$

Значить, за відсутності деформацій, досліджувана система працює як дві однопролітні балки прольотами $0,5l$. Це підтверджує і умова рівноваги шпренгельної балки

$$2 \frac{ql}{2} - 2 \frac{ql}{4 \sin \alpha} \cdot \sin \alpha + \frac{ql}{2} - ql \Rightarrow 0.$$

Все наведене про масу « m_3 » зтяжки (тяжа) правомірне і для інших типів комбінованих конструкцій. Це доведемо математично на основі таких міркувань.

Визначимо значення m_3 через зусилля в ній. Для цього значення « N_3 », визначене за формулою (17), підставимо у формулу (22). Тоді одержимо

$$m_3 = \frac{N_3 l}{2 \gamma_c R_y \cos \alpha}. \quad (24)$$

Підставивши у формулу (24) значення « l_3 » із формули (20), одержимо

$$m_3 = \frac{N_3 l_3}{\gamma_c R_y}. \quad (25)$$

З врахуванням залежності (21) із формули (15) матимемо

$$m_3 = A_3 \cdot l_3. \quad (26)$$

Отже, формула (26) відповідає формулі (22), з якої її одержали. Тому для неї правомірне все зазначене до формули (22), зокрема і графік, що показаний на рис. 3. Але формулу (26) правомірно застосувати не лише для одностоякової шпренгельної балки, але й для будь-якої системи – адже маса « m_3 » в ній залежить лише від довжини « l_3 » похиленого елемента та його перерізу « A_3 ». Тобто все наведене про кут « α » нахилу

елемента до горизонту можна вважати правомірним не лише для всіх комбінованих систем, але й для ферм.

Пошук раціональної висоти. Ефективність роботи комбінованої ферми — балко-ферми (балки шпренгельного типу) при симетричному навантаженні наведена в [5]. Отже, при висоті ферми $H = l/10$ балко-ферма працює однаково при повному тимчасовому навантаженні по всій довжині балко-ферми і при однобічному навантаженні. Різниця напружень у найбільш не вигідному перерізі складає всього 0,6 % [5].

На основі проведених досліджень видно, що при більших значеннях « H » балко-ферма при однобічному тимчасовому навантаженні працюватиме гірше, ніж при повному тимчасовому навантаженні по всій довжині балко-ферми. Отже, регулювання зусиль у елементах балко-ферми при $H > l/10$ стає менш ефективним. А при $H \leq l/10$ розроблена нами методика є ефективною — проводити розрахунок балко-ферми на однобічне тимчасове навантаження не потрібно.

Легкі комбіновані металеві конструкції з раціональними геометричними параметрами і роз-

рахунковим регулюванням НДС були використані під час будівництва та реконструкції багатьох будівель та споруд.

Наприклад, під час монтажу малоелементних шпренгельних ферм прольотом 18 м на будівництві 5-зіркового санаторно-готельного комплексу RoyalHotels&SPA Resort, корпус «Женева» в м. Трускавець Львівської області (2007 р.) спостерігали високу технологічність цих конструкцій, яка виражалась у істотному зниженні монтажної працездатності порівнянно з традиційними (відомими) конструкціями перекриттів та покриттів (рис. 4).

Загальний вигляд малоелементних шпренгельних ферм під час будівництва показано на рис. 4–6. Аналогічні результати було одержано під час будівництва бізнес-центру «Лемберг» (м. Львів, 2007 р.). Під час монтажу перекриттів цього об'єкта використання малоелементних комбінованих ферм з регулюванням зусиль дало можливість значно скоротити терміни будівельно-монтажних робіт.

Підкороквяні шпренгельні ферми прольотом 12 м з регулюванням НДС були успішно реалізовані на Львівському заводі експериментальних



Рисунок 4. Малоелементні шпренгельні ферми прольотом $L=18$ м. 5-зірковий санаторно-готельний комплекс RoyalHotels&SPA Resort, корпус «Женева» в м. Трускавець, Львівської обл., 2007 р.

механічних випробувань у 2004 р. Результати їх використання показали також високу ефективність запропонованих легких комбінованих металевих конструкцій, яка виражалась у зниженні собівартості будівельно-монтажних робіт за рахунок мінімальної їх працездатності та скороченні термінів будівництва.

Аналогічні техніко-економічні показники було одержано в результаті використання малоелементних шпренгельних ферм прольотами 12–18 м під час проведення будівельно-монтажних робіт на будівництві промислового об'єкта: завод «Карпатська кераміка», м. Калуш, Івано-Франківська обл., 2011 р. і фізкультурно-оздоровчого комплексу, м. Львів, вул. Зубрівська, 2012 р. (рис. 5–6).

Практика використання запропонованих конструкцій на будівельних об'єктах під час будівництва нових та реконструкції існуючих, а також у разі підсилення будівельних конструкцій засвідчила їхню високу технологічність під час виготовлення та монтажу.

Широкий спектр використання таких конструкцій можна доповнити прикладами з практики реконструкції і будівництва мостових переходів нафтогазових трубопроводів через р. Дністер (м. Борислав, 2010 р.), а також під час реконструкції і підсилення металевих конструкцій цементного підприємства в м. Миколаєві, Львівської обл., фірма

«Альба» у с.м.т. Щирці та «ВЕЕМ» у м. Львові. Крім того, раціональні комбіновані металеві конструкції прольотами 9, 18, 24, 30 м були використані на об'єктах Управління капітального будівництва Львова та Львівської області, фірм «СПБ» (м. Львів), КНП м. Трускавець, Львівської області.

Економічний ефект від впровадження раціональних комбінованих ферм з розрахунковим регулюванням їх НДС порівняно з типовими конструкціями становить від 3 283 до 5 808 грн. на 1 тону металу конструкції. Загальний економічний ефект від використання раціональних комбінованих металевих конструкцій з врахуванням експлуатації будівель і зменшення будівельного об'єму становить 6 118 271 грн.

Висновки

1. Досягнення в галузі будівельної механіки та обчислювальної техніки, розробки і досліджень нових конструктивних форм, будівельних матеріалів, технології виготовлення і монтажу створили передумови для широкого застосування сучасних раціональних комбінованих систем.
2. Обсяг їх застосування в нашій країні невеликий, що визначається рядом факторів, у тому



Рисунок 5. Малоелементні комбіновані ферми $L = 6, 12$ м. Завод «Карпатська кераміка», м. Калуш, Івано-Франківська обл., 2011 р.



Рисунок 6. Комбіновані ферми покриття, $L = 12$ і 18 м. Фізкультурно-оздоровчий комплекс, м. Львів, вул. Зубрівська, 2012 р.

- числі відсутністю детальних теоретичних і експериментальних досліджень їх дійсної роботи, рекомендацій з конструювання і розрахунку, що забезпечують високу надійність і економічність конструкцій.
3. Розрахунковий метод регулювання зусиль в комбінованих металевих системах на стадії проектування, що супроводжується шляхом раціонального підбору геометричних параметрів конструкцій, не передбачає додаткових витрат на створення регулюючих зусиль і тому є більш ефективним.
 4. Показано, що раціональність комбінованої конструкції в цілому залежить як від жорсткості проміжних опор підтримуючої системи, так і від топології.
 5. Доведено, що маса нерозрізної балки жорсткості на проміжних пружних опорах, порівняно з балкою на двох опорах прольотом до 60 м,

інтенсивно зменшується при наявності не більше трьох опор.

6. Визначено раціональні кути нахилу підкосів, тяжів і вант комбінованих конструкцій по відношенню до їх маси в діапазоні 30–60°.
7. На прикладі малоелементної комбінованої шпренгельної ферми встановлено, що при співвідношенні її висоти до прольоту 1/10 і більше достатнім є розрахунок тільки на симетричне навантаження. Врахування ефекту пружності опор дає можливість зменшити висоту комбінованої конструкції.
8. Результати досліджень впроваджено в практику будівництва, в результаті чого був отриманий економічний ефект 6 118 тис. грн.
9. Розроблені методики можуть бути використані в проектній та розрахунковій практиці конструкторських і науково-дослідних організацій будівельного профілю.

Література

1. Баженов, В. А. Будівельна механіка. Комп'ютерний курс [Текст] : підруч. для вищих техн. закл. освіти / В. А. Баженов, С. Я. Гранат, О. В. Шишов. — К. : [б. в.], 1999. — 584 с. — ISBN 5-7763-1771-1.
2. Бириулёв, В. В. Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор [Текст] / В. В. Бириулёв. — М. : Стройиздат, 1984. — 86 с.
3. Гоголь, М. В. Ефективні комбіновані металеві конструкції [Текст] / М. В. Гоголь // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. научн. трудов Одесской гос. академии строительства и архитектуры. Часть 2. — Одесса, 2010. — № 14. — С. 63–68.
4. Гоголь, М. В. Особливості регулювання напружено-деформованого стану комбінованих сталевих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь, М. Р. Більський // Промислове будівництво та інженерні споруди. — 2009. — № 1. — С. 6–9.
5. Гоголь, М. В. Особливості роботи балко-ферм при несиметричному навантаженні [Текст] / М. В. Гоголь // Вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» : Теорія і практика будівництва. — Львів, 2007. — № 600. — С. 63–67.
6. Гоголь, М. В. Особливості розрахунку будівельних конструкцій із регулюванням зусиль [Текст] / М. В. Гоголь // Будівельні конструкції : міжвід. наук. збірник / НДІБК. — К., 2003. — Вип. 59, Книга 1. — С. 271–278.
7. Гоголь, М. В. Проектування і розрахунок комбінованих мостових переходів [Текст] / М. В. Гоголь, М. Р. Більський, І. Д. Пелешко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту заліз-

References

1. Bazhenov, V. A.; Granat, S. Ya.; Shishov, O. V. Structural analysis. Computer course. The textbook for high engineering institutions. Kyiv: [s. n.], 1999. 584 p. ISBN 5-7763-1771-1. (in Ukrainian)
2. Biriulev, V. V. Steel uncut construction with control of level of supports. Moscow: Stroiizdat, 1984. 86 p. (in Russian)
3. Gogol, M. V. Powerful combined metal construction. In: *Current civil constructions from steel and wood. Edited Volume. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. The second Part.* Odessa, 2010, Number 14, p. 63–68. (in Ukrainian)
4. Gogol, M. V.; Bilskii, M. R. Regulatory aspects of strain-stress state of combined metal construction. In: *Industrial engineering and engineering construction*, 2009, Number 1, C. 6–9. (in Ukrainian)
5. Gogol, M. V. Operation aspects of beam gantry under out-of-balance load. In: *Mercury of National University «Lviv polytechnic» Theory and Practise of Civil Engineering.* Lviv, 2007, Number 600, p. 63–67. (in Ukrainian)
6. Gogol, M. V. Particularities of structural analysis with effort regulation. In: *Engineering construction: International Edited Volume*, 2003, Issue 59, book 1, p. 271–278. (in Ukrainian)
7. Gogol, M. V.; Bilskii, M. R.; Peleshko, I. D. Design and analysis of bridge crossing. In: *Bridges and tunnels: theory, researches, practice: Edited Volume of Lazaryan Dnepropetrovsk National University of Railway transport*, 2012, Issue 3, p. 33–38. (in Ukrainian)
8. Gogol, M. V. Design and calculation of rational combined metal structures. In: *Metal Constructions*,

- ничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 33–38.
8. Гоголь, М. В. Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14, № 4. – С. 253–262.
 9. Гоголь, М. В. Розрахунковий метод регулювання зусиль в металевих конструкціях – ефективний напрямок їх раціонального проектування [Текст] / М. В. Гоголь // Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури. – Макіївка, 2009. – Випуск 2009-4(78) : Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – С. 149–154.
 10. Gogol, Miron. Shaping of effective steel structures [Текст] / Miron Gogol // Budownictwo i inzynieria srodowiska: zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. – Rzeszow, 2009. – № 264, z. 52. – S. 43–56.
 11. Гоголь, М. В. Узагальнений метод розрахунку металевих конструкцій з регулюванням зусиль [Текст] / М. В. Гоголь // Вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2002. – № 462. – С. 25–34.
 12. Деклараційний патент 48841 А Україна, МКИ 7 E 04 C 3/08. Шпренгельна балка [Текст] / [Гоголь М. В., Чайка Б. С., Гайда О. М., Надала І. В. (Україна)]; заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка», Гоголь Мирон Васильович, Гайда Олександр Миколайович, Чайка Борис Степанович, Надала Ігор Володимирович. – № 2001128874 ; заявл. 21.12.01 ; опубл. 15.08. 02, Бюл. № 8. – 2 с.
 13. Егоров, В. В. Развитие конструктивных форм и методов расчета комбинированных систем шпренгельного типа [Текст] : автореф. дис. на соискание научн. степени д-ра техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / В. В. Егоров. – СПб., 2004. – 49 с.
 14. Lubinski, M. Konstrukcje metalowe. Czesc 1 [Текст] / M. Lubinski, A. Filipowicz, W. Zoltowski. – Warszawa : «Arkady», 2003. – 646 p.
 15. Lubinski, M. Konstrukcje metalowe. Czesc 2 [Текст] / M. Lubinski, W. Zoltowski. – Warszawa : «Arkady», 2004. – 566 p.
 16. Металеві конструкції [Текст] / [В. О. Пермяков, А. А. Нілов, О. В. Шимановський і інш.] ; під ред. В. О. Пермякова і О. В. Шимановського. – К. : Видавництво «Сталь», 2008. – 812 с.
 17. Пермяков, В. А. Комбинированные металлические конструкции с регулированием и их оптимизация [Текст] / В. А. Пермяков, М. В. Гоголь, И. Д. Пелешко // Наука и инновации в современном строительстве : Междунар. научн.-практ. конф., 17–19 окт. 2007 г. / Сакт-Петербургский государственный архитектурно-строительный ун-т. – СПб. : СПбГАСУ, 2007. – С. 142–145.
 18. Пермяков, В. О. Проблема регулювання напружено-деформованого стану плоских стержневих металевих конструкцій [Текст] / В. О. Пермяков, М. В. Гоголь // Вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008, Volume 14, Number 4, p. 253–262. (in Ukrainian)
 9. Gogol, M. V. Calculation method of efforts control in metall constructions – effective direction of their rational designing. In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2009, Issue 2009-4(78): tower constructions: materials, constructions and technical process, p. 149–154. (in Ukrainian)
 10. Gogol, Miron. Shaping of effective steel structures. In: *Budownictwo i inzynieria srodowiska: zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej*. Rzeszow, 2009, № 264, Z. 52, s. 43–56.
 11. Gogol, M. V. Generalized method of calculation of metal constructions taking into account force control. In: *Mercury of National University «Lviv polytechnic» Theory and practice of civil engineering*, Lviv, 2002, Number 462, p. 25–34. (in Ukrainian)
 12. Declaration patent 50014 A Ukraine, MKI 7 E 04 C 3/10 B 66 C17/00. Beam construction / Gogol, M. V.; Gaida, O. M. (Ukraine); informer and patent owner State University «Lviv Politechnic» ; Gogol, M. V.; Gaida, O. M. No. 99127148 ; declaration 28.12.99; published 15.10.02, Bul. No. 10. 2 p. (in Ukrainian)
 13. Egorov, V. V. The development of constructive forms and methods of calculation of combined systems of strut-framed type: Authors abstract, Ph.D. thesis in Engineering science: Speciality 05.23.01 «Civil constructions, buildings and structures». St. Peterburg, 2004. 49 p. (in Russian)
 14. Lubinski, M.; Filipowicz, A; Zoltowski, W. Konstrukcje metalowe. Warszawa: 12, «Arkady», 2003. 646 p.
 15. Lubinski, M.; Zoltowski, W. Konstrukcje metalowe. Czesc 2. Warszawa: «Arkady», 2004. 566 p.
 16. Permiakov, V. O.; Nilov, A. A.; Shymanovskiy, O. V. Edited by Permiakov, V. O.; Shymanovskiy, O. V. Metal Constructions. Kyiv: Publisher «Steel», 2008. 812 p. (in Ukrainian)
 17. Permiakov, V. O.; Gogol, M. V.; Peleshko, I. D. Composite metal constructions with regulation and their optimization. In: *Science and innovation in current civil engineering: International research-to-practice conference, 17–19, October, 2007*. St. Peterburg: SPbGASU, 2007, p. 142–145. (in Russian)
 18. Permiakov, V. O.; Gogol, M. V. The problems of regulation of stress and strain state of two dimensional bar metal constructions. In: *Mercury National University «Lviv Politechnic»: Theory and practice of civil engineering*. Lviv, 2004, Number 495, p. 154–157. (in Russian)
 19. Permiakov, V. O. (Ed.); Gogol, M. V.; Peleshko, I. D.; Bilskiy, M. R.; Chaika, B. S. Design of well-minded composite metal constructions. Textbook. Lviv: Publisher National University «Lviv Politechnic», 2005. 180 p. (in Ukrainian)
 20. Permiakov, V. O.; Gogol, M. V. Design recommendations of well-minded metal load-

- літехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2004. – № 495. – С. 154–157.
19. Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] : Навч. посібник / [В. О. Пермяков, М. В. Гоголь, І. Д. Пелешко, М. Р. Більський, Б. С. Чайка]; за ред. проф. В. О. Пермякова. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 180 с.
 20. Пермяков, В. О. Рекомендації з проектування раціональних металевих несучих конструкцій перекриття та покриття [Текст] / В. О. Пермяков, М. В. Гоголь. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 24 с.
 21. Advances in Steel Structures [Текст] : Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Steel Structures 13–15 June 2005, Shanghai, China. Volume I / Edited by Z. Y. Shen, G. Q. Li, S. L. Chan. – Amsterdam : Elsevier, 2005. – 917 p.
 22. Трофимович, В. В. Оптимальное проектирование металлических конструкций [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. – К. : Будівельник, 1981. – 136 с.
 23. Янковский, А. П. Равнонапряженное армирование тонкостенных конструкций [Текст] : дис. ... доктора физ.-мат. наук : 01.02.04 / Янковский Андрей Петрович. – Новосибирск, 2007. – 484 с.
 - carrying structures of overhead covers and covers. Lviv: Publisher National University «Lviv Politechnique», 2006. 24 p. (in Ukrainian)
 21. Advances in Steel Structures: Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Steel Structures 13–15 June 2005, Shanghai, China. Volume I. Edited by Z. Y. Shen, G. Q. Li, S. L. Chan. Amsterdam: Elsevier, 2005. 917 p.
 22. Trofimovich, V. V.; Permiakov, V. A. Optimal design of metal constructions. Kyiv: Constructor, 1981. 136 p. (in Russian)
 23. Yankovskii, A. P. Equal stressed reinforcing of thin-slab structure: Doctoral dissertation in Physico-Mathematical Science. 01.02.04. Novosibirsk, 2007. 484 p. (in Russian)

Гоголь Мирон Васильович — к.т.н., доц. кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка». Академік Академії будівництва України. Наукові інтереси: регулювання зусиль в будівельних конструкціях розрахунковим методом, оцінка технічного стану та проектування раціональних металевих конструкцій, посилення конструкцій.

Гоголь Мирон Васильевич — к.т.н., доц. кафедры строительного производства Национального университета «Львовская политехника». Академик Академии строительства Украины. Научные интересы: регулирование усилий в строительных конструкциях расчетным методом, оценка технического состояния и проектирование рациональных металлических конструкций, усиление конструкций.

Gogol Myron — Ph.D., associate professor; Build Production Department, National University «Lviv Politechnique». An academician of the Academy of Civil Engineering of Ukraine. Scientific interests: adjusting of efforts in build structures by a calculation method, estimation of the technical state and planning of rational metallic structures, strengthening of structures.