

ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК КОМБІНОВАНИХ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ

Стаття присвячена питанню проектування і розрахунку комбінованих металевих переходів з врахуванням деформованого стану балки жорсткості і використанням розрахункового методу регулювання їх напружено-деформованого стану. Наведено результати теоретичних досліджень для проектування раціональних комбінованих систем.

Ключові слова: комбіновані конструкції, регулювання зусиль, раціональне проектування, розрахунковий метод

Актуальність проблеми

Удосконалення конструктивних форм стержневих металевих конструкцій будівель та споруд пов'язане безпосередньо з проблемами їх собівартості, надійності і оптимізації. В багатьох випадках при розрахунку металевих комбінованих конструкцій мостових переходів на опорах у вигляді гнучких стійок (рис. 1 і 2), а також при підсиленні (рис. 3) доцільно враховувати пружність опор в процесі сприймання ними експлуатаційних навантажень.



Рис. 1. Вантовий металевий мостовий перехід, Україна

Цього можна досягти вибором розрахункових моделей з урахуванням геометричної і конструктивної не лінійності системи, вдосконаленням методів їх розрахунку і проектування рівнонапружених конструкцій, розробленням нових, раціональніших (з низькою металоємністю і трудомісткістю виготовлення) конструктивних форм і удосконалення методів регулювання їх напружено-деформованого стану. Крім цього відомі факти просідання твердих опор внаслідок їх деформацій. Тому проблема подальшого удосконалення теорії і методів розрахунку такого класу мостових систем з одночасним забезпеченням економічності (зниження собівартості), безпеки експлуатації та надійнос-

ті як проектованих так і існуючих конструкцій є актуальною.



Рис. 2. Комбінований металевий мостовий перехід, Німеччина



Рис.3. Комбінована шпренгельна конструкція (залізобетонні балки і металевий шпренгель), Австрія

Аналіз останніх досліджень і публікацій та невирішених раніше частин проблеми

Розрахунок кожного виду таких комбінованих мостових переходів існуючим методом [1] має свої особливості. Розрахунок балок жорсткості – нерозрізних балок на пружних опорах, як основних елементів таких переходів, класичними методами будівельної механіки дає відносно точні результати [11]. Разом з тим деякі суттєві особливості цих систем, а саме їх нелі-

нійність не дають можливості реальної оцінки їх дійсного напруженого-деформованого стану (НДС) з використанням існуючих – звичних методів розрахунку [6–10, 12]. Це робить такі комбіновані конструкції не завжди раціональними [1, 2]. Наближені методи розрахунку, наприклад енергетичний більш придатний для автоматизації проектування і тому виникає потреба їх подальшого удосконалення [2–4]. Тому розвиток методу розрахунку комбінованих металевих конструкцій, який відображав би їх дійсну роботу є на даний час актуальною проблемою.

Мета і задачі досліджень

Метою роботи є удосконалення існуючих методів розрахунку комбінованих конструкцій з врахуванням їх дійсного НДС та його розрахункове регулювання.

Виклад основного матеріалу

Основна задача при розрахунку сталевих конструкцій мостових переходів, з якою зустрічається інженер, є одержання рівномірної конструкції, тобто найбільш раціональної системи. Основним методом, на даний час, для одержання такої конструкції є метод наближень. Кількість наближень може досягати великого числа і залежить в першу чергу від досвіду і інтуїції конструктора, при яких рідко досягається мети. Тому, проблема розрахунку будівельних конструкцій, в тому числі комбінованих, насамперед повинна ставитись як проблема їх раціонального проектування. В даній роботі розвивається метод, який дозволяє одночасно з вирішенням оберненої задачі - раціонального проектування, одержати і вирішення прямої задачі розрахунку (НДС) конструкції. В якості критерію раціональності виступає енергетичний критерій раціонального проектування, а також вимоги до НДС: рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість, або мінімальна маса конструкції. Такі комбіновані системи вимагають в свою чергу розробки, як розрахункового методу регулювання зусиль так і методу розрахунку таких комбінованих конструкцій з врахуванням деформованого стану балки жорсткості [2]. Ще у 70-х роках минулого століття М. М. Лашенко [6] писав, щоб ще під час проектування конструкцій (не обов'язково попередньо напружених) передбачити в майбутньому можливість перерозподілу в них зусиль (перспективне регулювання). Завдання полягає в тому [6], щоб заздалегідь пе-

редбачити перспективне регулювання напружень, активно уміщуватись (впливати) на «гру сил» (зусиль) і розподілити їх в бік, вигідний для визначених умов роботи.

Аналіз відомих методів регулювання НДС стержневих металевих конструкцій дав змогу виявити цілий ряд їх недоліків, які особливо яскраво виступають на комбінованих конструкціях. Величина недонапруження матеріалу в об'ємі елемента, а, значить, і у всій конструкції, яка складається із елементів, проектант не цікавить. А недонапружений матеріал створює непотрібне додаткове навантаження на конструкцію і спричиняє її подорожчання. Характерною особливістю комбінованих конструкцій є їхні великі прольоти та зосередження більшої маси матеріалу конструкції в одному елементі – балці жорсткості. Ігнорування цієї особливості комбінованих конструкцій у традиційній методиці розрахунку є неприпустимим. Адже на зусилля в їх елементах значно впливає деформований стан конструкцій. Наприклад, врахування прогинів балки у вантового мосту змінює величини зусиль в елементах системи від 4,31 % до 6,62 % [12]. Тим більше, що вітчизняні норми тепер теж вимагають врахування геометричної нелінійності конструкцій, викликану переміщенням елементів конструкцій, у яких її врахування викликає зміну зусиль і переміщень більш ніж на 5 % [5]. А створення в балці жорсткості не одного розрахункового перерізу, в якому $\sigma_{\max} \cong R_y$, а кількох, може значно зменшити масу конструкції.

Але використання традиційного методу сил не дозволяє виділити із системи балку жорсткості, а розглядає всі елементи конструкції за масою матеріалу рівноцінними. Щоб визначити деформований стан конструкції, потрібно виконати додаткові доволі складні розрахунки. Але у цьому деформованому стані значення прогинів, визначені на початку розрахунку, вже будуть іншими – їх потрібно визначати заново. Крім того, доведення у всіх елементах системи підкріплення величини напружень у перерізах до значень $\sigma_{\max} \cong R_y$, не дає рівноекстремальної епюри «М» у балці жорсткості. Щоб якось виправити ситуацію, доводиться надавати попереднє напруження конструкції, яке лише дещо покращує напружений стан балки жорсткості, але значно додає до вартості технологічних витрат.

У праці [10] виділено у розрахунку комбінованих конструкцій балку жорсткості із всієї системи, замінивши розсічені елементи, що

прилягають до балки, невідомими силами. Це дало змогу підібрати таке значення сил, яке дало б можливість створити у балці жорсткості поліекстремальну епюру «М», кращу від тієї, яку дає класичний метод сил. Але у методиці розрахунку [10] проігноровано суть канонічних рівнянь методу сил, кожне з яких є рівнянням взаємного переміщення суміжних перерізів розсіченої в'язі за напрямком невідомого, яке діє у цій в'язі. Рівняння для визначення невідомих внутрішніх сил S_i ($i = \overline{1, n}$), запропоновані у [9], є математичним записом лише принципу рівноваги, який є достатнім лише для розрахунку не пружних систем. Тому ці значення S_i ($i = \overline{1, n}$) є дещо завищеними. Про це відзначено у працях [7, 8], в яких частково враховується деформативність системи підкріплення.

Отже, бачимо, що для регулювання НДС комбінованих конструкцій потрібно розробити таку методику їх розрахунку, яка давала б змогу, подібно до [10], виокремити із системи балку жорсткості, але не ігнорувала б сумісності деформацій пружних систем. Крім того, ця методика повинна не після визначення невідомих сил S_i ($i = \overline{1, n}$), а на початку розрахунку знаходити деформативний стан конструкції, який було б враховано під час визначення невідомих внутрішніх сил. Нова методика розрахунку повинна також передбачати можливість регулювання жорсткості системи підкріплення балки жорсткості, отже, регулювати значення

екстремумів «М» у поліекстремальній епюрі «М» балки жорсткості.

Суть такого регулювання полягає в раціональному виборі топології конструкцій, характеру закріплень на опорах, розрахунку її геометричних параметрів і жорсткісних характеристик стержневих елементів. В процесі збільшення зовнішнього навантаження в ній відбувається попередньо розрахований раціональний перерозподіл внутрішніх зусиль між елементами з одержанням НДС аналогічного, як від дії попереднього напруження. Такі прийоми дозволяють регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій в любых системах, що дозволяє вважати їх універсальними [2, 3].

Також, для розрахунку більш широкого класу комбінованих конструкцій необхідно було розробити ітераційний алгоритм, а для можливості проведення розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості використати енерго-варіаційні принципи і методи декомпозиції та синтезу [3–4]. Суть розрахунку: спочатку на основі методу декомпозиції системи, розділимо систему на дві підсистеми – головну і допоміжну. Вперше запропоновано єдину розрахункову модель комбінованих систем у вигляді балки на пружних опорах – головна підсистема, в якій балка моделює балку жорсткості, а пружні опори – систему підкріплення – допоміжна (рис. 4).

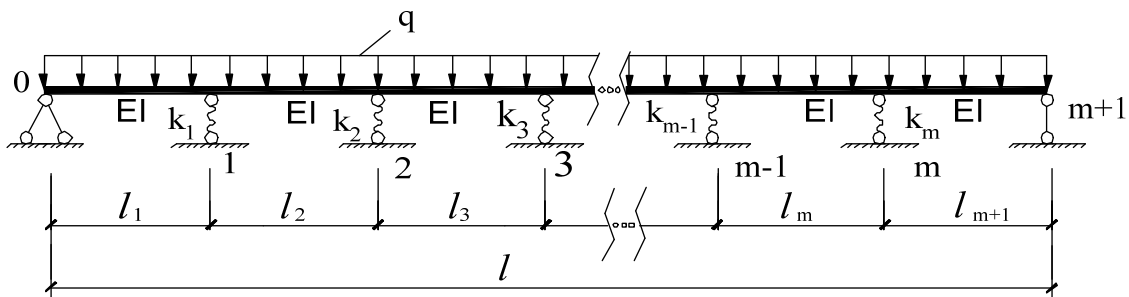


Рис. 4. Схема узагальненої розрахункової моделі

Пружними опорами вважаються елементи (вертикальні і похилі) комбінованої конструкції (системи). Допоміжною підсистемою вважаємо конструкцію шпренгеля або ванта. При цьому для розрахунку використано не статичні принципи, а енерго-варіаційні, зокрема принцип Лагранжа. Для запропонованої розрахункової моделі математична модель описується на основі повної потенційної енергії системи (рис. 5).

У розробленому методі розрахунку – математичній моделі - використаємо енергетичний підхід, застосувавши варіаційне рівняння Лагранжа [2], яке базується на принципі варіації переміщень за умови задоволення рівнянь статки, тобто

$$\delta E = 0 \quad (1)$$

де E – повна енергія системи.

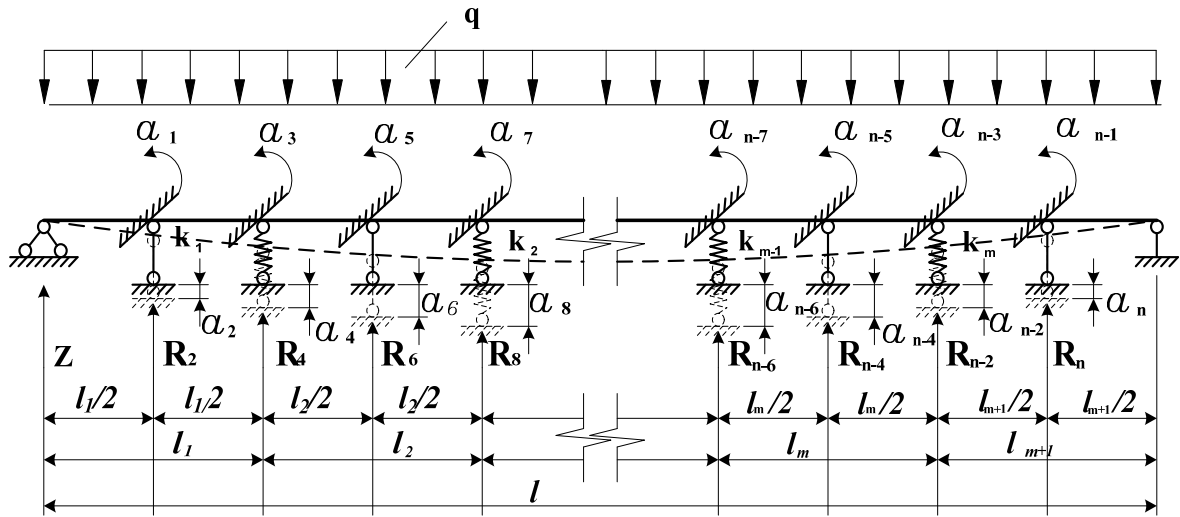


Рис. 5. Схема для математичної моделі розрахунку балки жорсткості комбінованих систем з врахуванням її деформованого стану

Отже, для наших умов повна потенційна енергія E системи запишеться так

$$\begin{aligned} \varepsilon = U + \Pi = & \frac{1}{2} \int_0^l EJ \left(\frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 dx + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} K_i V_i^2 - \int_0^l V q dx - \frac{1}{2} \frac{\Delta l^2}{l} EA \end{aligned} \quad (2)$$

де Δl – поздовжня деформація стержня (балки), v – функція прогинів балки у всіх точках по її довжині.

Скористаємося методом Тимошенко-Рітца. За цим методом функцію $v(x)$ задамо рядом

$$v_x = \sum_{i=1}^{n-1} a_i \phi_i \quad (3)$$

де a_i – шукані параметри функцій $\phi_i (i = \overline{1, n-1})$; ϕ_i – задані функції, що задовольняють граничні та краєві умови.

Врахувавши умову (1), після деяких перетворень запишемо так

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n r_{ij} \Delta_i - P_i \right) = 0$$

Для наших умов, згідно із рис.1 та залежністю (3), переміщення $\Delta_i (i = \overline{1, n})$ позначимо через $a_i (i = \overline{1, n-1})$. У точках «і» у нас є пружні опори, в яких від зовнішнього навантаження q виникають реактивні сили $R_i (i = \overline{1, n-1})$. Тоді для наших умов рівняння запишеться так

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=1}^{n-1} r_{ij} a_j + R_{iq} \right) = 0$$

Підставивши визначені параметри $r_{ij} (i, j = \overline{1, n})$ та $R_{iq} (i = \overline{1, n})$ одержимо дійсні переміщення балки, тобто її деформований стан, чого відомі методи [2] не дають. Далше, використавши синтез системи, розраховуємо її напружено-деформований стан. Маючи значення $R_i (i = 4, 8, 12, \dots, n-2)$, знаходимо зусилля у елементах підкріплюючої системи, яка при цьому є статично визначеною. Маючи зусилля у всіх елементах системи, перевіряємо їх міцність – в залежності від елемента системи, який розглядаємо. Якщо міцність в якомусь елементі не витримана, збільшуємо його переріз. Правильність підібраних $A_i (i = \overline{1, n})$ перевіряємо умовно деформації системи, яку визначаємо за методом Мора, враховуючи лише нормальні сили у елементах системи. При чому деформація системи є обмеженою прогинами балки жорсткості на пружних опорах. Отже, бачимо, що подана методика розрахунку дозволяє одержати у балці жорсткості поліекстремальну, з потрібними значеннями екстремумів, епюру M_q без попереднього напруження системи тільки використовуючи розрахунковий метод регулювання НДС.

Отримані диференційні залежності для визначення величин деформацій і осідання пружних опор балки жорсткості в матричній формі і запропоновані розрахункові формули для визначення НДС комбінованих конструкцій. Такий метод дає можливість визначити деформо-

ваний стан балки жорсткості, який враховується при розрахунку зусиль в елементах комбінованої системи, що забезпечує рівномірність всіх елементів з максимальною економією сталі до 17 %.

На базі удосконаленого методу розрахунку комбінованих металевих конструкцій з врахуванням деформованого стану балки жорсткості розроблено метод регулювання НДС комбінованих конструкцій шляхом визначення раціональної топології та жорсткісних характеристик поперечних перерізів елементів. Це забезпечує можливість регулювання НДС в балці жорсткості по її довжині для отримання рівних напружень в розрахункових опорних і пролітних перерізах. Розроблений метод дає можливість регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій у всіх типах комбінованих систем.

На основі запропонованого критерію раціональності комбінованих металевих конструкцій, доведено, що маса нерозрізної балки жорсткості на проміжних пружних опорах, порівняно з балкою на двох опорах прольотом до 45...60 м, інтенсивно зменшується при наявності не більше трьох проміжних пружних опор. Визначено раціональні кути нахилу підкосів, тяжів і вант комбінованих конструкцій по відношенню до їх маси в діапазоні 30...60° [3].

На основі аналізу результатів виконаних досліджень і вивчення впливу деформованого стану балки жорсткості на роботу комбінованої конструкції розроблені пропозиції з удосконалення їх конструктивних рішень і запропоновані нові конструктивні форми комбінованих систем меншою масою до 20 %, які захищені патентами України на винаходи (Патенти України: № 50014, № 46383, № 48841).

Висновки

1. При проектуванні і розрахунку комбінованих мостових металевих переходів розробленим методом враховуються прогини балки жорсткості в місцях проміжних опор.

2. Розроблений розрахунковий метод регулювання зусиль у комбінованих системах дозволяє одержати рівномірну конструкцію ще на стадії її проектування.

3. Методи регулювання зусиль в комбінованих металевих системах здійснюються на стадії їх проектування шляхом раціонального підбору геометричних параметрів конструкцій без додаткових витрат на створення регулюючих зусиль і тому є більш ефективними.

4. Розроблені конструкції дозволяють максимізувати концентрацію матеріалу в балках жорсткості і є технологічними при мінімальній кількості елементів, що знижує їх трудомісткість.

5. Технологія виготовлення і монтажу таких систем є менш затратною та легко засвоюваною не тільки спеціалізованим але і загальнобудівельними підприємствами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гоголь, М. В. Ефективні комбіновані конструкції будівель та мостів [Текст] / М. В. Гоголь // Теорія і практика будівництва: вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 662. – С. 142–149.
2. Гоголь, М. В. Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14. – № 4. – С. 253–262.
3. Гоголь, М. В. Теорія і практика регулювання напружено-деформованого стану комбінованих металевих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2010. – № 2. – С. 2–4.
4. Гоголь, М. В. Узагальнений метод розрахунку металевих конструкцій з регулюванням зусиль [Текст] / М. В. Гоголь – Теорія і практика будівництва // Вісник НУ «Львівська політехніка» – 2002. – № 462. – С. 25–34.
5. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. [Текст]. – Введ. 2007-02-01. – К.: Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
6. Лашенко, М. Н. Регулирование напряжений в металлических конструкциях [Текст] / М. Н. Лашенко – Л.; М.: Госстройиздат, 1966. – 191 с.
7. Сингаевский, П. М. Определение рациональной формы решетки из гибких элементов в предварительно-напряженных арочных фермах с жестким верхним поясом [Текст] / П. М. Сингаевский, Е. М. Кожевников // Известия вузов. – 1974. – № 1. – С. 77–78.
8. Смирнов, Ю. В. К расчету вантово-балочных конструкций [Текст] / Ю. В. Смирнов, Л. Н. Волкова // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. – № 6. – С. 67–69.
9. Трофимович, В. В. Оптимизация металлических конструкций [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. – К.: Вища школа, 1983. – 200 с.
10. Трофимович, В. В. Оптимальное проектирование металлических конструкций [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. – К.: Будівельник, 1981. – 136 с.
11. Рабинович, И. М. Основы строительной механики стержневых систем [Текст] / И. М. Рабинович – М.: Госстройиздат, 1956. – 454 с.

12. Przemyslaw Jakiel. Ocena wplywow nieliniowych w stalowym moscie wantowym z pomostem skladanym [Текст] / Jakiel Przemyslaw, Manko Zbigniew // Teoria konstrukcji: XLIII konferencja naukowa komitetu inzynierii ladowej i wodnej pan i

komitetu nauki PZITB. – Poznan; Krynica, 1997. – Том 5. – P. 41–48.

Надійшла до редколегії 02.07.2012.
Прийнята до друку 24.07.2012.

М. В. ГОГОЛЬ, М. Р. БИЛЬСКИЙ, И. Д. ПЕЛЕШКО (Национальный университет «Львовская политехника»)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННЫХ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Статья посвящена вопросу проектирования и расчету комбинированных металлических переходов с учетом деформированного состояния балки жесткости и использованием расчетного метода регулирования их напряженно-деформированного состояния. Приведены результаты теоретических исследований для проектирования рациональных комбинированных систем.

Ключевые слова: комбинированные конструкции, регулирование усилий, рациональное проектирование, расчетный метод

M. V. GOGOL, M. R. BILSKY, I. D. PELESHKO (Lviv Polytechnic National University)

DESIGN AND CALCULATION OF COMBINED BRIDGE TRANSITION

Article is devoted on the design and calculation of the combined metal transitions taking into account the strain state of the beam stiffness and using the calculation method of regulation of the stress-strain state. The results of theoretical studies for the rational design of combined systems.

Keywords: combined construction, management effort, good design, calculation method