

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ

© Гоголь М.В., Коцій Я.Й., 2013

Розроблено методику раціонального проектування комбінованих сталевих конструкцій. Показано результати досліджень розрахункового регулювання НДС у комбінованих конструкціях, переваги і область використання розрахункового методу. Запропоновано основний і чотири допоміжних критеріїв раціональності комбінованих сталевих конструкцій. Під час проектування раціональних комбінованих мостових металевих переходів необхідно враховувати прогини балки жорсткості.

Ключові слова: методика раціонального проектування, комбіновані конструкції, розрахункове регулювання зусиль, конструктивна форма.

The method rational design of combined steel structures. The following research results in the current SDS regulations combined structures, benefits and scope of applicability calculation method. The proposed primary and four auxiliary criteria of rationality combined steel structures. When designing rational combination of bridge transition metal must be considered beam deflection stiffness.

Key words: methods of rational design, combined construction, settlement adjustment efforts, constructive form.

Постановка проблеми та її актуальність

Одним з найважливіших напрямів прогресу в будівельній індустрії є підвищення надійності і довговічності, зниження матеріаломісткості будівельних конструкцій на основі максимального використання всіх резервів міцності. Це зумовлює особливу актуальність розробок нових полегшених і одночасно надійних і довговічних інженерних конструкцій, передусім мостів і мостових переходів.

З метою обґрунтованого підвищення ефективності таких конструкцій, забезпечення надійної та безпечної їх експлуатації упродовж заданого терміну велику увагу варто звернути на методологію їх раціонального проектування. Вирішення цієї проблеми полягає передовсім у правильному визначенні типу систем раціональних конструкцій, прийнятті раціональних конструктивних параметрів таких систем, використанню заданих критеріїв раціональності, а також у перевірці їх на відповідність принципам формування раціональних комбінованих конструкцій.

У зв'язку з цим найперспективнішим, а часто і єдино можливим, є підхід, який ґрунтується на розвитку існуючих і розробленні нових конструктивних форм та методів їх розрахунку, що не вимагає жодних додаткових матеріальних витрат [1–4]. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання розрахункового регулювання напружено-деформованого стану (НДС) у металевих комбінованих конструкціях під час проектування, який відповідав би цим вимогам [5–8].

Основною задачею під час проектування будівельних конструкцій, з якою стикається інженер, є одержання рівномірної конструкції, тобто найраціональнішої системи. Тому проблема розрахунку будівельних конструкцій, зокрема комбінованих, насамперед повинна ставитись як проблема їх раціонального проектування. Отже, раціональне проектування є актуальною проблемою, вирішення якої приведе до значного економічного ефекту, а це спільно становить велику і важливу наукову проблему.

Для вирішення поставленої проблеми потрібен розвиток і підвищення ефективності сучасних математичних моделей і методів, що додають процесу проектування необхідну наукову обґрунтованість і зводять до мінімуму елемент суб'єктивності під час вибору проектних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Це, своєю чергою, вимагає розробки нових методів їх розрахунку і проектування, регулювання НДС конструкцій, що дає змогу зменшити внутрішні зусилля і тим самим знизити витрату матеріалів і повніше використовувати матеріальні ресурси. Тому останнім часом проектувальники все частіше використовують розрахунковий перерозподіл зусиль і регулювання НДС конструкцій, що не вимагає ніяких додаткових матеріальних витрат [1, 2]. Особливо це актуально для комбінованих металевих конструкцій. Приклади використання таких конструктивних схем для комбінованих конструкцій мостових переходів наведено на рис. 1–3. Треба зазначити їх актуальність – вантовий мостовий перехід відкрито в Словаччині в 2012 році (рис. 3).

У багатьох випадках під час розрахунку та проектування сталевих конструкцій мостових переходів (рис. 1–3) доцільно враховувати пружність опор у процесі сприймання ними експлуатаційних навантажень [8]. Водночас деякі суттєві особливості цих систем, а саме їх нелінійність, не дають можливості реальної оцінки їх дійсного НДС з використанням існуючих звичних методів розрахунку [6-7]. Це робить такі комбіновані конструкції не завжди раціональними [1, 2]. Тому розвиток методу розрахунку комбінованих металевих конструкцій, який відображав би їх дійсну роботу, є на даний час також актуальною проблемою.



Рис. 1. Вантовий металевий мостовий перехід, Україна



Рис. 2. Комбінований металевий мостовий перехід, Німеччина

Мета досліджень

Основною метою досліджень є підвищення ефективності і розробка методології раціонального проектування комбінованих сталевих конструкцій.

Завдання досліджень

Розробка послідовності проектування і розрахунку раціональних комбінованих сталевих конструкцій і їх нових конструктивних форм, узагальнення практичного досвіду впровадження розрахункового методу НДС.



Рис. 3. Новий вантовий мостовий перехід, Словаччина

Виклад основного матеріалу

З метою надання процесу раціонального проектування комбінованих металевих конструкцій (сталевих мостових переходів) необхідної наукової обґрунтованості і зведення до мінімуму елемент суб'єктивності під час вибору проектних рішень визначені принципи такого проектування і його послідовність (рис. 4). Спочатку необхідно вибрати раціональний тип запропонованих (див. рис. 4)

комбінованих металевих конструкцій для найраціональнішого використання його під час вирішення конкретної технічної задачі. Критерієм для вибору є можливість досягнення поставленої мети – вибір топології, можливість перекриття необхідного прольоту за заданої конструктивної висоти, забезпечення потрібної жорсткості, малоелементність і технологічність, вартість, концентрація матеріалу, естетика тощо.

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 % [8]. А створення в балці жорсткості не одного розрахункового перерізу, в якому $\sigma_{\max} \cong R_y$, а кількох, може значно зменшити масу конструкції. Проведені нами дослідження показали, що раціональну комбіновану конструкцію можна розробити лише за умови тісного взаємозв'язку між її формоутворенням та розрахунком на основі запропонованого розрахункового методу регулювання зусиль [7]. Після цього під час раціонального проектування таких конструкцій з метою одержання всіх її елементів рівномірними, тобто найраціональніших систем, необхідно забезпечити раціональні геометричні параметри: раціональну кількість опор балки жорсткості – кількості підкріплень у балці жорсткості не більше трьох, а в разі симетричних вантових систем їх може бути не більше чотирьох, а також величини кутів нахилу підкосів, тяжів і вант і відповідну висоту комбінованої конструкції. За більшої кількості підкріплень раціональність конструкції зменшується, водночас вона потребує більше витрат. Звідси, узагальнювальним принципом формоутворення нових конструктивних систем є те, що ці системи повинні бути комбінованими і мати якомога менше елементів та вузлів їх з'єднання.

Отже, створюючи раціональні конструктивні комбіновані системи, критеріями раціональності, очевидно, будуть (рис. 4):

- регулювання НДС розрахунковим методом на базі варіювання співвідношень деформативності балки жорсткості та підтримувальної системи;
- забезпечення рівномірного напруженого стану в розрахункових перерізах балки жорсткості;
- концентрація матеріалу в основному елементі (балці жорсткості);
- малоелементність і технологічність конструкцій – розроблення вихідних систем з мінімальною кількістю елементів, максимальне використання прокатних профілів, застосування високоефективних видів профілів, використання прокату з підвищеними механічними властивостями. Зазначені вище критерії покладені в основу розроблення нових комбінованих систем (рішень), або вдосконалення наявних, що забезпечує їхню раціональність і ефективність.

Але часто досконалий напружений стан конструкції під навантаженням не дає гарантії її найменшої вартості на практиці, тому що за такої вартості зараховується технологія виготовлення, монтажу та експлуатації. Досягти його можливо лише у разі дотримання таких умов:

а) кількості підкріплень у балці жорсткості не більше трьох, а в разі симетричних вантових систем їх може бути не більше чотирьох.

б) регулювати моменти в балці жорсткості можна також зміною віддалей між підкріпленнями;

в) основну масу матеріалу потрібно зосереджувати в балці жорсткості;

г) балку жорсткості раціонально проектувати із ефективного прокатного профілю або складеного;

д) під час несиметричного навантаження жорсткість забезпечується за допомогою похилих стояків;

е) з метою підвищення ефективності комбінованих конструкцій, тобто зниження витрат матеріалу за заданої несучої спроможності або жорсткості, необхідно використовувати розрахункове регулювання їх НДС без силового втручання;

е) регулюють моменти у балці жорсткості переважно раціональним перерозподілом матеріалу в системі балка – елементи підкріплення;

ж) регулювати моменти в балці жорсткості можна також зміною кута нахилу похилих стояків;

з) регулювати зусилля в комбінованій конструкції загалом можна зміною кута нахилу приопорних елементів шпренгеля, який працює за принципом ванта, і за рахунок цього можливе зменшення кута його нахилу до балки жорсткості від 45° до 30°;

і) регулювання зусиль зміною кутів нахилу похилих стояків і приопорних елементів шпренгеля зумовлює зменшення загальної висоти комбінованих систем, що впливає на загальну висоту будівлі;

и) зміна кутів нахилу елементів системи підкріплення забезпечує регулювання нормальних сил у балці жорсткості з метою кращого використання матеріалу в її роботі. У результаті цього можна досягти збільшення нормальних сил і зменшення згинальних моментів у балці жорсткості;

к) комбіновані системи з регулюванням НДС необхідно проектувати загалом з мінімальною кількістю вузлів.

Виконання цих умов забезпечить досягнення сформульованого основного критерію раціональності: формоутворення комбінованої металевої конструкції буде раціональним лише тоді, коли ця конструкція матиме найменшу вартість на практиці від усіх можливих форм відомих конструкцій за однакового навантаження і прольоту та забезпечення потрібної жорсткості конструкцій.

Формоутворення раціональних комбінованих систем ґрунтується на таких основних принципах: мінімізація витрат матеріалу і вартості їх виготовлення під час забезпечення раціональних геометричних параметрів (рис. 4).

Принципи формоутворення нових типів конструкцій ґрунтуються, очевидно, на якісному оцінюванні відомих конструкцій, на вмінні виявити їхні позитивні та негативні ознаки. Тільки відкинувши у відомих конструкціях все негативне і посиливши все позитивне, можемо створити нові типи конструкцій, які будуть кращі від відомих.

Але принцип мінімальних матеріаловитрат не є достатнім. Тому другим принципом формоутворення є мінімальні технологічні затрати на виготовлення конструкції.

На жаль, обидва зазначені принципи є взаємно протилежні: балка із прокатного профілю має мінімальні технологічні затрати, але максимальну масу, а ферма, навпаки, – мінімальну масу, але максимальні технологічні затрати. Отже, раціональною буде якась проміжна конструкція, що матиме у своєму складі таку балку, яка вимагатиме мінімум фермових елементів. Тобто, це буде синтез параметрів малої маси ферми та малих технологічних затрат балки. Такими конструкціями є комбіновані – шпренгельні та вантові.

Отже, розглянемо детальніше кожен із таких основних принципів формоутворення раціональних комбінованих конструкцій:

– мінімізація витрат матеріалу та його вирішення трансформуванням епюри моментів;

– принцип мінімальних технологічних витрат та його вирішення трансформуванням топології конструкцій.

Маса звичайної балки на двох шарнірних опорах під час трансформації епюри M_x із моноекстремальної у рівноекстремальну за допомогою проміжних пружних опор, інтенсивно падає лише до кількості прольотів $n \leq 4$, тобто за максимум трьох проміжних пружних опор. У разі більшої кількості таких опор маса балки зменшується повільно, тоді як кожна нова опора збільшує пропорційно масу підкріплювальної системи – вантової чи шпренгельної. Оскільки маса балки ідентифікується з її вартістю, то цей самий висновок можна зробити і стосовно вартості балки, що збігається із числовими дослідженнями [7], виконаними для вантових систем за розробленою у цій роботі методикою.

Але часто досконалий напружений стан конструкції під навантаженням не дає гарантії її найменшої вартості на практиці, тому що у таку вартість входить технологія виготовлення, монтажу та експлуатації. Характерним прикладом тут є ферма, для якої з умов уніфікації перерізів та довжин елементів свідомо зменшують значення коефіцієнта повноти напруженого стану конструкції. Більше того, хоч ферма може мати досконалий напружений стан, а балка має найнедосконаліший, але з умов технології прокатні балки мають перевагу перед фермами за прогонів до $l \approx 18$ м. Це тому, що прокатна балка складається лише з одного елемента і зовсім не має вузлів, тоді як у фермі, навіть за умов уніфікації, є кілька типів елементів та багато вузлів з'єднання цих елементів. І щоб оцінити економічну ефективність, необхідно порівняти приведені затрати (вартість на практиці) раціональної комбінованої конструкції з приведеними затратами типового (звичного) варіанта (рис. 4).

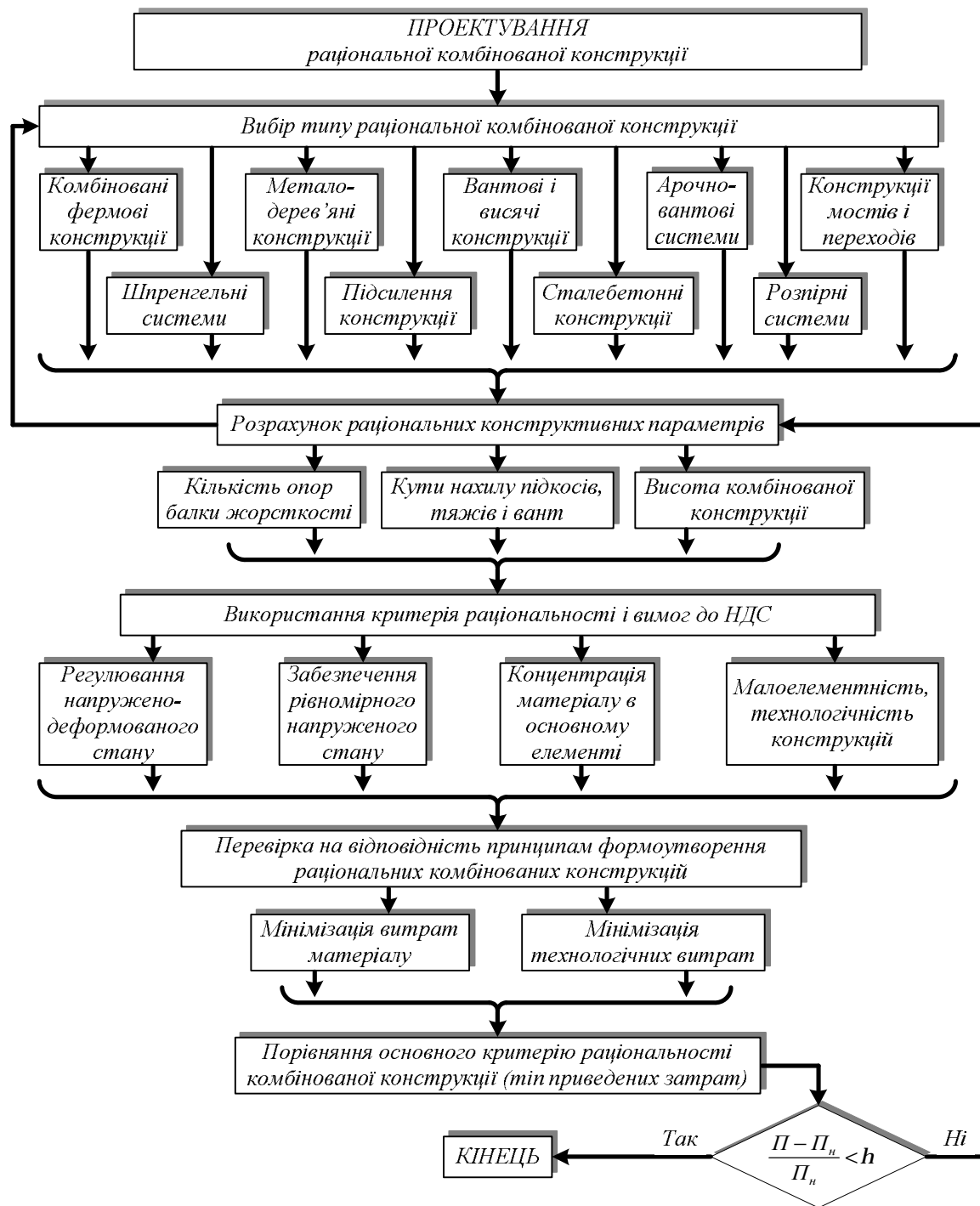


Рис. 4. Методика проектування раціональної комбінованої конструкції

Для забезпечення регулювання НДС розрахунковим методом на базі варіювання співвідношень деформативності балки жорсткості та підтримувальної системи необхідно провести розрахунок комбінованої конструкції. Наприклад, суть розрахунку раціональної шпренгельної комбінованої конструкції: [6–7] спочатку на основі методу декомпозиції системи розділяється систему на дві підсистеми – головну і допоміжну. Далі, використавши синтез системи, розраховується її напружено-деформований стан. На рис. 5 подано схему математичної моделі ітераційного процесу проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій.

Критерієм раціональності є енергетичний критерій раціонального проектування [6], а також вимоги до НДС: рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість або мінімальна маса конструкції.

Суть такого регулювання полягає в раціональному виборі топології конструкцій, характеру закріплень на опорах, розрахунку її геометричних параметрів і жорсткісних характеристик стержневих елементів. У разі 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 допомагають регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій у будь-яких системах, що дає змогу вважати їх універсальними [2, 3]. Розроблена методика розрахунку дає можливість 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 деформований стан балки жорсткості, який враховують під час розрахунку зусиль в елементах комбінованої системи, що забезпечує рівномірність усіх елементів з максимальною економією сталі до 17 %.

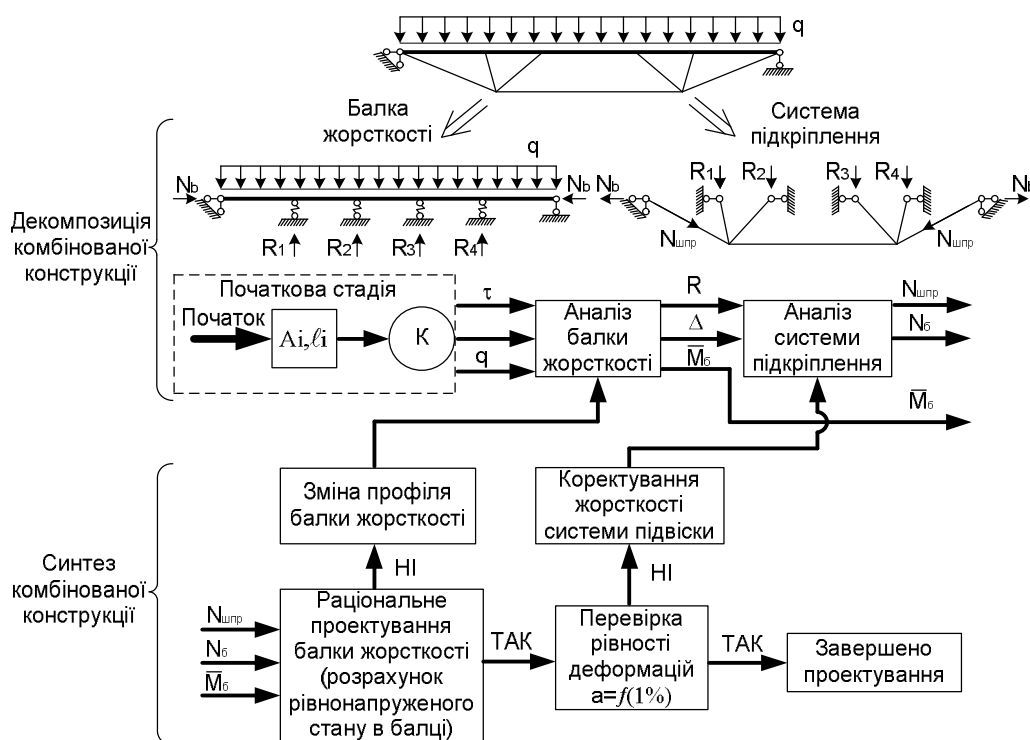


Рис. 5. Схема математичної моделі ітераційного процесу проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій

На основі удосконаленого методу розрахунку комбінованих металевих конструкцій з урахуванням деформованого стану балки жорсткості розроблено метод регулювання НДС комбінованих конструкцій за допомогою визначення раціональної топології та жорсткісних характеристик поперечних перерізів елементів. Це забезпечує можливість регулювання НДС у балці жорсткості по її довжині для отримання рівних напружень у розрахункових опорних і прольотних 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 прольотів до 45–60 м, інтенсивно зменшується за наявності не більше трьох проміжних пружних опор. Визначено раціональні кути нахилу підкосів, тяжів і вант комбінованих конструкцій відносно 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 розроблено пропозиції з удосконалення їх конструктивних рішень і запропоновано нові конструктивні форми комбінованих систем меншою масою до 20 %, які захищені патентами України на винаходи (Патенти України: № 50014, № 46383, № 48841) [5].

Висновки

1. Розроблена методика раціонального проектування комбінованих сталевих конструкцій.
2. Запропонований основний і чотири допоміжні критерії раціональності комбінованих конструкцій.
3. Під час проектування раціональних комбінованих мостових металевих переходів необхідно враховувати прогини балки жорсткості.
4. Розроблений розрахунковий метод регулювання зусиль у комбінованих системах дає змогу одержати рівномісну конструкцію уже на стадії проектування.
5. Методи регулювання зусиль у комбінованих металевих системах на стадії проектування, що супроводжуються раціональним підбором геометричних параметрів конструкцій, не передбачають додаткових витрат на створення регулюючих зусиль і тому є ефективнішими.
6. Розроблені конструкції дозволяють максимальну концентрацію матеріалу в балках жорсткості і є технологічними за мінімальної кількості елементів, що знижує їх працемісткість.
7. Запропонований новий метод розрахунку регулювання зусиль повинен знайти застосування не лише у шпренгельних, але й фермових і вантових конструкціях – адже виокремлена у новому методі розрахунку балка жорсткості працює однаково у всіх комбінованих конструкціях.
8. Технологія виготовлення і монтажу таких систем є простішою і доступною не тільки спеціалізованим заводам і організаціям.

1. Гоголь М. В. *Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих коняструкцій* / М. В. Гоголь // *Металеві конструкції*. – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 253–262. 2. Гоголь М. В. *Узагальнений метод розрахунку металевих конструкцій з регулюванням зусиль* / М. В. Гоголь // *Теорія і практика будівництва: вісник нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – Львів, 2002. – № 462. – С. 25–34. 3. Gogol Miron. *Shaping of effective steel structures* / Miron Gogol // *Budownictwo i inzynieria srodowiska: zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej*. – Rzeszow, 2009. – № 264. – Z. 52. – S. 43–56. 4. Давыдов Е. Ю. *Металлические тонколистовые покрытия зданий и сооружений из панелей-оболочек индустриального изготовления: автореф. дис. на соискание научн. степени д-ра. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»* / Е. Ю. Давыдов. – М., 2011. – 41 с. 5. *Деклараційний патент 48841 А Україна, МКИ 7 Е 04 С 3/08. Шпренгельна балка* / [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 Олексій Миколайович, Чайка Борис Степанович, Надала Ігор Володимирович – № 2001128874; заявл. 21.12.01; опубл. 15.08. 02, Бюл. № 8. – 2 с. 6. Егоров В.В. *Развитие конструктивных форм и методов расчета комбинированных систем шпренгельного типа: 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. 7. *Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій* / [Пермяков В. О, Гоголь М. В., Пелешко І. Д., Більський М. Р., Чайка Б. С.]; за ред. проф. В.О. Пермякова: навч. посібник. – Львів: Видавництво Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2005. – 180 с. 8. Гоголь М.В. *Проектування і розрахунок комбінованих мостових переходів* / М. В. Гоголь, М. Р. Більський, І. Д. Пелешко // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 33–38.