

РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД РЕГУЛЮВАННЯ ЗУСИЛЬ У СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧЕНИХ СИСТЕМАХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

У цій статті приведені результати дослідження нового методу регулювання напружено-деформованого стану статично невизначених систем. Доведено, що найбільш ефективним є таке регулювання в процесі проектування комбінованих сталевих конструкцій та реконструкції каркасів будівель і споруд.

Ключові слова: комбіновані системи, регулювання зусиль, підсилення, напружено-деформований стан

В этой статье приведены результаты исследования нового метода регулирования напряженно-деформированного состояния статически неопределенных систем. Доказано, что наиболее эффективным является регулирование в процессе проектирования комбинированных стальных конструкций и реконструкция каркасов зданий и сооружений.

Ключевые слова: комбинированные системы, регулирование усилий, усиление, напряженно-деформированное состояние

In the article the results of investigation are presented for new method of stress-deformation state regulation concerning statically indefinite systems. It is proved that the most effective regulation is during design of steel combine structures and carcass reconstruction for buildings and structures.

Keywords: combined systems, regulation of efforts, strengthening, stress-deformation state

Актуальність проблеми

Проектування нових конкурентно спроможних сталевих конструкцій типу комбінованих систем та вирішень актуальних питань підсилення каркасів існуючих будівель і споруд на сучасному рівні вимагає скорочення витрат праці та матеріалів. Цього можна досягнути за рахунок удосконалення методів регулювання напружено-деформованого стану комбінованих металевих конструкцій та підсилення сталевих каркасів, що експлуатуються з урахуванням регулювання в них зусиль.

Аналіз останніх досліджень публікацій

Вплив зміни жорсткості елементів статично невизначеної стрижневої системи на перерозподіл зусиль у статично невизначеній системі досить детально був досліджений А. В. Перельмутером [1]. Показано, що зміна жорсткості якого завгодно стрижня веде до зміни зусиль в сіх елементах системи. Це дає можливість шляхом підбору відповідних співвідношень моментів інерції поперечних перерізів елементів системи, що працюють на згин і стиск, регулювання їх напружено-деформованого стану. Подальший розвиток методів вивчення перерозподілу зусиль у результаті зміни жорсткості елементів комбінованих металевих конструкцій висвітлений у роботі [2], де описаний запропонований розроблений автором новий метод регулювання на-

пружено деформованого стану (НДС) комбінованих систем, який у подальшому названий розрахунковим. Перевага останнього над регулюванням НДС за допомогою попереднього напруження [3], яке дає зменшення маси матеріалу не завжди оправдане додатковими витратами праці а в окремих випадках і енергетичних ресурсів полягає у наступному. Вказаних недоліків можна уникнути у разі використання у процесі розрахунку і проектування комбінованих металевих конструкцій методу розрахункового регулювання зусиль [2]. Нові ефективні комбіновані металеві конструкції удосконаленої технології з розрахунковим регулюванням НДС запатентовані і впроваджені у практику будівництва [4-7, 9-18].

Мета і задачі досліджень

Метою даної роботи є науково-практичний аналіз впровадження у будівництво та реконструкцію промислових та цивільних об'єктів основ теорії розрахункового регулювання НДС комбінованих металевих конструкцій. Задачі досліджень полягають у кількісному аналізі ефективності розрахункового регулювання зусиль в металевих конструкціях при їх проектуванні та впровадженні у виробництво. Крім цього, при підсиленні існуючих сталевих конструкцій необхідно також проводити аналіз ефективності регулювання зусиль різними методами.

Методика досліджень містить в собі вибір шляхів досягнення мети та вирішення поставлених у роботі задач. Для цього використовуються варіаційні методи дослідження роботи і розрахунку нерозрізних балок на пружних опорах, які моделюють комбіновані системи з розрахунковим регулюванням зусиль.

Виклад основного матеріалу

Досягнення мети, визначений у даній роботі досягається вирішенням поставлених задач.

Суть розрахунку [2] комбінованих систем полягає у наступному. На основі методу декомпозиції системи, розділяємо систему на дві підсистеми – головну і допоміжну. Далі, використавши принцип синтезу системи, розраховуємо її напружено-деформований стан. На рис. 1 представлена схема математичної моделі ітераційного процесу проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій.

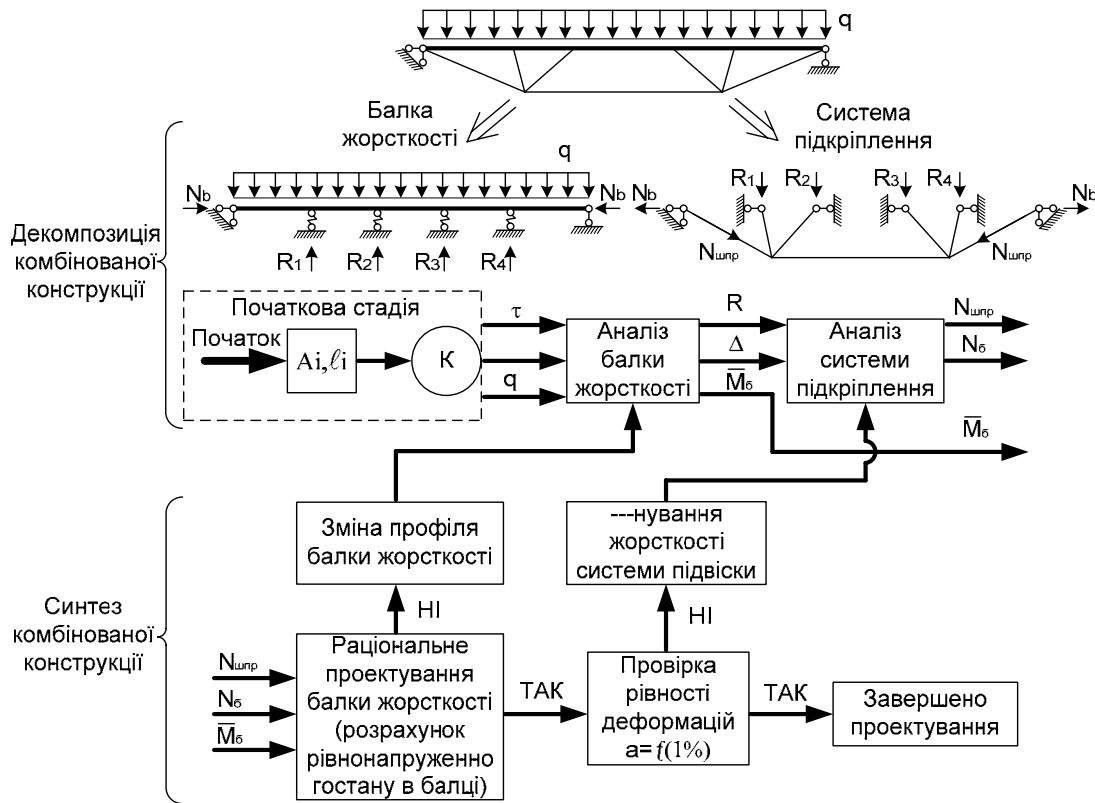


Рис. 1. Схема математичної моделі ітераційного процесу проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій

В якості критерію раціональності виступає енергетичний критерій раціонального проектування [7], а також вимоги до напружено-деформованого стану: рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість, або мінімальна маса конструкції [2].

Таким чином запропоновано єдину розрахункову модель комбінованих систем (на основі методу декомпозиції системи) у вигляді балки на пружних опорах [2], в якій балка моделює балку жорсткості, а пружні опори – систему підкріплення.

Отже, суть розрахункового регулювання напружено-деформованого стану системи полягає у такому підборі геометричних

параметрів і жорсткісних характеристик елементів системи, раціональному виборі топології конструкцій, характеру закріплень на опорах, яка дозволить у її деформованому стані отримати бажаний розподіл зусиль.

В процесі збільшення зовнішнього навантаження в ній відбувається попередньо розрахований раціональний перерозподіл внутрішніх зусиль між елементами з одержанням напружено-деформованого стану аналогічного, як від дії попереднього напруження. Розкриття потенціалу регулювання, що криється в таких комбінованих системах шляхом раціонального формування напружено-деформованого стану в перетинах конструкції вже на стадії

де знаком « T » позначено, що над матрицями потрібно виконати транспонування.

Для визначення елементів матриці та векторів рівняння (2) скористаємося функціями $\varphi_i (i = \overline{1, n})$, що подані у рівнянні (3), для схеми на рис. 2. При цьому прийемо невідомі параметри $a_i (i = \overline{1, n})$ цих функцій рівними одиниці. Функції $\varphi_i (i = \overline{1, n})$ є кусково-

лінійними. За принципом суперпозиції вони мають границі лише у межах між зв'язками, які не переміщуються, тобто зв'язки, які на даному етапі не переміщуються, є їх границями. Природні крайні зв'язки є крайніми умовами балки. Отже, функція φ_1 при $a = 1$ має вигляд, як подано на рис. 3.

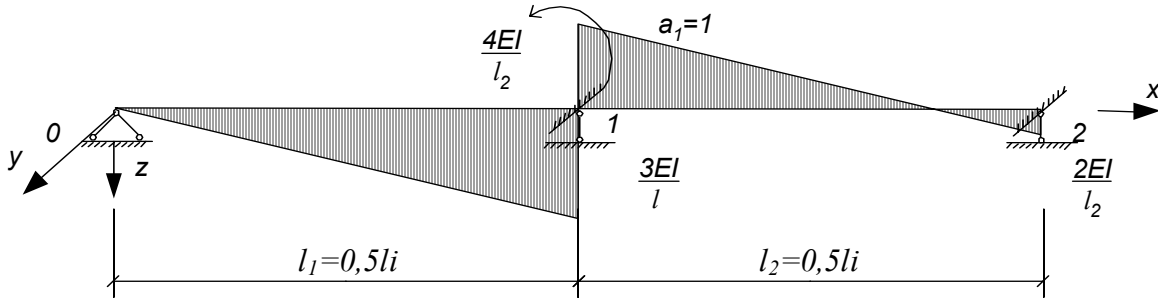


Рис. 3. Еюра функції $\bar{\varphi}_1$

Виділивши на рис. 2 за методом січень вузли 1 та 2 на основі принципу рівноваги одержимо

$$\sum M_1 = 0 \Rightarrow r_{11} = \frac{4EI}{l_2} + \frac{3EI}{l_1} = \frac{14nEI}{l};$$

$$\sum Z_1 = 0 \Rightarrow r_{21} = \frac{3EI}{l_1^2} - \frac{6EI}{l_2^2} = -\frac{12n^2EI}{l^2};$$

$$\sum M_2 = 0 \Rightarrow r_{31} = \frac{2EI}{l_2} = \frac{4EI}{l};$$

$$\sum Z_2 = 0 \Rightarrow r_{41} = \frac{6EI}{l_2^2} = \frac{24n^2EI}{l^2}$$

Аналогічно визначаються і інші елементи матриць матричного рівняння (3). Підставивши заповнені матриці у рівняння (3), знайдемо компоненти невідомого вектора \bar{A} за відомими правилами розв'язування матричних рівнянь, а саме

$$\begin{aligned} R\bar{A} + R_q = 0 &\Leftrightarrow R\bar{A} = -\bar{R}_q \Leftrightarrow R^{-1}R\bar{A} = -R^{-1}\bar{R}_q \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \bar{A} = -R^{-1}\bar{R}_q \end{aligned}$$

Знайшовши із залежності (4) компоненти вектора \bar{A} (переміщення точок балки) перевіряємо за формулою (1) достатність жорсткості системи. Якщо виявиться, що вона недостатня, збільшуємо значення EI балки чи K пружних опор, чи те і інше одночасно, і розрахунок повторюємо, аж поки нерівність (1) не буде витриманою.

Після того знаходимо зусилля S (моменти,

нормальні і поперечні сили) у потрібних перерізах S_i , ($i = \overline{1, m}$)

$$S_i = S_{iq} + \sum_{j=1}^n \bar{S}_{ij} a_j \quad (i = \overline{1, m})$$

де S_{iq} – зусилля S у перерізі « i » від зовнішнього навантаження; \bar{S}_{ij} – зусилля у перерізі « i » від одиночного значення параметру a_j функції φ_j , ($j = \overline{1, n}$).

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. Якщо при цьому збільшення I перевершить 5% від попередньо заданого, виконуємо заново розрахунок балки на пружних опорах і все повторюємо.

Таким чином нами розроблена узагальнена математична модель розрахунку усіх можливих типів балкових конструкцій, яка може бути застосована і для розрахунку стиснених стержнів.

Подано характеристику цієї моделі у порівнянні з відомими моделями, які зараз застосовують для розрахунку різних типів балок. Наша модель може бути застосована для будь-якого типу балок – як звичайних, так і з саморегульованим напружено-деформованим станом. У залежності від типу балкової конструкції у розробленій математичній моделі

змінюються лише параметри « n » та « K ». Покажемо, як це відбувається.

а) $n=1$. Тоді одержуємо звичайну однопрогінну балку на твердих опорах. Методика розрахунку таких балок загальновідома. Затруднення викликає іноді хіба що визначення прогину балки. Розроблена нами математична модель такої балки принципово відрізняється від існуючої методики: у нас саме прогин балки визначається на початку розрахунку, а вже потім – зусилля. За обсягом обчислень обидві методики приблизно однакові.

б) $(1 < n < \infty) \vee (K < \infty)$. Тоді одержимо балку на пружних опорах, подану на рис. 1. На її прикладі якраз і розроблена подана математична модель.

в) $(1 < n < \infty) \vee (K \rightarrow \infty)$. Тоді одержимо багатопогінну балку на твердих опорах. Теорія розрахунку таких балок розроблена ґрунтовно. Вона базується на розв'язуванні системи неоднорідних рівнянь, коефіцієнти і вільні члени яких знаходити не дуже складно. Але визначення прогинів таких балок залишається проблематичним. У нашій моделі потрібно лише у прольотах балки поставити штучні лінійні та кутові зв'язки, а також на твердих опорах кутові зв'язки – і задача готова до розв'язування. Від попередньої буде відрізнитися лише тим, що тверді опори не матимуть лінійних переміщень (прогинів балки на цих опорах) і у розрахунках не фігуруватиме

коефіцієнт « K » жорсткості опор.

г) $(n \rightarrow \infty) \vee (K < \infty)$. Тоді одержимо балку на пружній основі Вінклера при крайніх твердих опорах. Теорія розрахунку таких балок також розроблена ґрунтовно. Вона ще складніша від попередніх. Базується на розв'язуванні диференційного рівняння четвертого порядку для прогинів та згинальних моментів, що дозволяє знаходити ті і ті величини. Цією теорією користується дуже вузьке коло інженерів, яке спеціалізується по ній. У нас для розрахунку такої балки потрібно по її довжині через 1 м поставити на балку лінійні і кутові зв'язки і в цих точках зосередити пружність основи. Тоді балка стане, як подана на рис. 1, тільки віддаль між опорами буде задана – вона дорівнюватиме 1 м, а значення K залишиться яким було – зміниться лише його розмірність – вона стане кН/м.

д) $(n \rightarrow \infty) \vee (K \rightarrow \infty)$. Тоді одержимо стержень на твердій основі, який здатний випучуватися у площині основи під дією нормальних сил N , тобто такий стержень розраховується на стійкість при стисканні.

Впровадження у практику будівництва запропонованих комбінованих систем дало очікувальні результати. Так економія матеріалу досягла 27 % при значному скороченні працездатності (рис. 4-9).



Рис. 4. Монтаж малоелементної шпренгельної ферми прольотом $L=12$ м. Санаторій «Женева», м. Трускавець, 2004 р.



Рис. 5. Загальний вид балко-ферми перекриття в процесі будівництва L=18 м.
м. Трускавець, санаторій «Женева», 2007 р.



Рис. 6. Малоелементні комбіновані ферми перекриття з регулюванням зусиль L=12 м.
Бізнес-центр «Підзамче», м. Львів, 2007 р.



Рис. 7. Підкрівлена балко-ферма L=12 м. Завод експериментальних механічних випробувань,
м. Львів, 2004 р.



Рис. 8. Балко-ферма перекриття



Рис. 9. Балко-ферми перекриття в складі монолітного залізобетонного перекриття

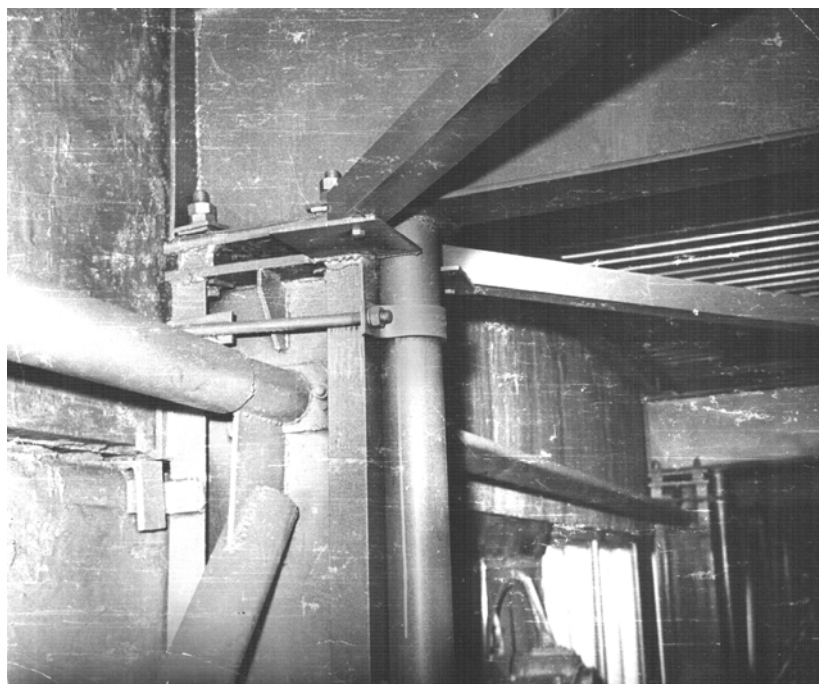


Рис. 10. Посилення колон цеху Калушського ВО «Нафтобурмашремонт»
регулюючими елементами із труб (м. Калуш)

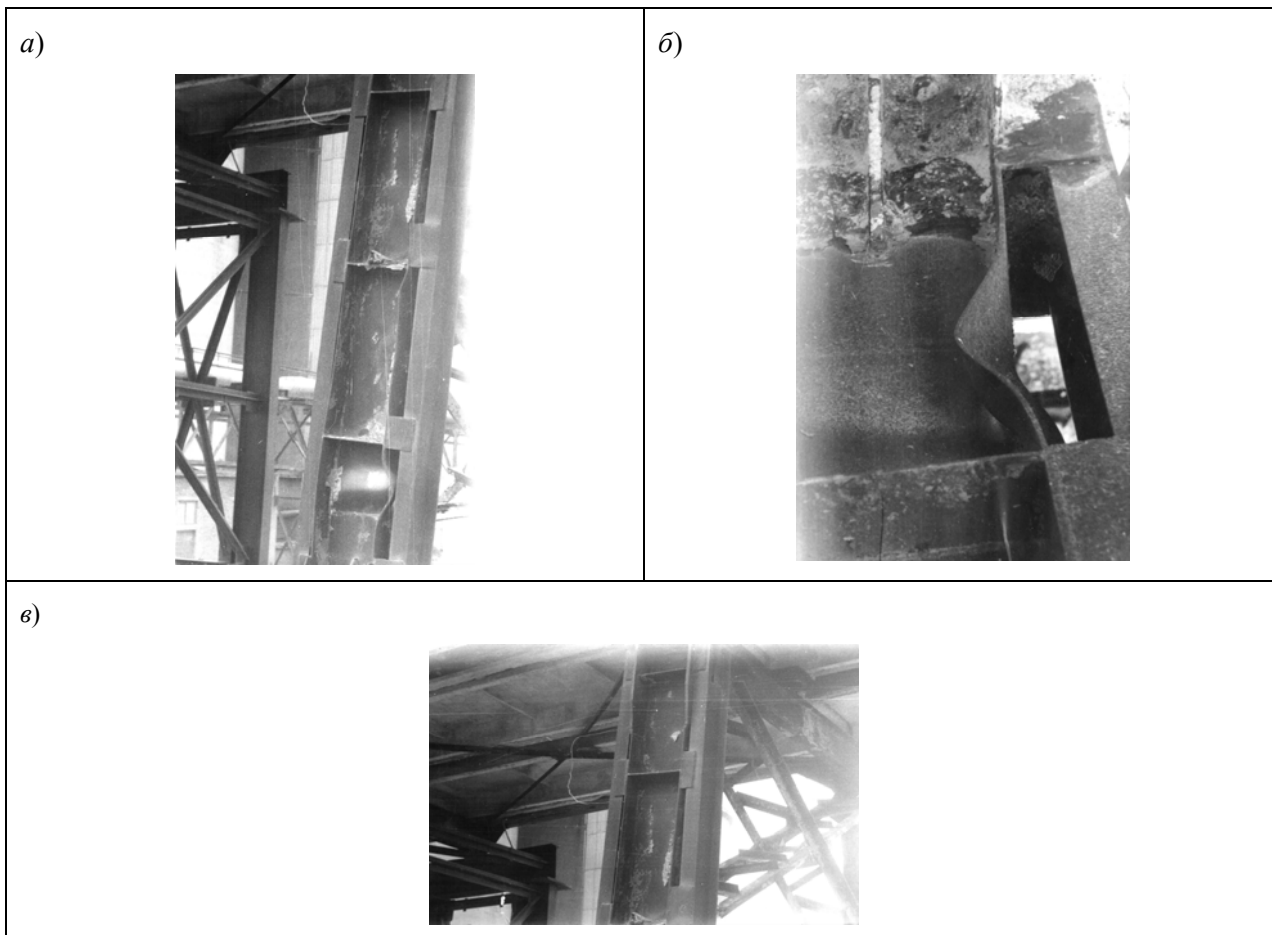


Рис. 11. Посилення сильно деформованих колон естакади Рівненського ВО «Азот» (а, б, в – фрагменти)



Рис. 12. Посилення стиснутих розкосів ферм покриття прольотом 36 м котельні Бурштинської ТЕС

Регулювання НДС сталевих конструкцій, які знаходяться в умовах експлуатації доцільно виконувати в процесі їх посилення під експлуатаційним навантаженням [8]. Величина регулюючого (розвантажуючого) зусилля може визначатися з умов, як рівнонапруженості на контакт основного і посилюючого перерізів, так і додаткового зменшення деформацій (прогинів)

посилених конструкцій. Остання умова враховувалась при посиленні поздовжньо стиснутих конструкцій (стійок, колон, великопрогінних ферм покриття) промислових будівель: Калушського підприємства «Нафтобурмашремонт», Рівненського ВО «Азот», Бурштинської ТЕС та ін.

Для проектування раціонального посилення рам каркасів будівель і споруд необхідно враховувати жорсткості якої-небудь ділянки, або окремого елемента рамної системи приведе до перерозподілу в ній зусиль загалом. При цьому може виникнути питання, які елементи треба посилити, щоб добитися максимального підвищення стійкості рами загалом. Посилення самої стійки дає значно більший ефект, ніж посилення контура або закладення вузла [8]. Необхідно також встановити, які з стійок рами підлягають посиленню насамперед. Для збереження симетрії посиленню підлягають, дві крайні або дві середні стійки. Для встановлення, яку пара стійок потрібно посилити, систему доводять до критичного стану. При цьому розглядають два випадки. У першому прикладають фіктивну силу до двох крайніх стійок. У другому – до двох середніх стійок. Посилювати треба насамперед ті стійки, які витримують найменшу критичну силу. Із збільшенням жорсткості крайніх стійок запас стійкості рами зріс на 4 % аналогічне збільшення жорсткості середніх стійок запас стійкості рами був підвищений на 10,5 %. Таким чином, посилення середніх стійок виявилось більш ефективним. Разом з тим посилення середніх стійок із збільшенням їх жорсткості на 50 % підвищує коефіцієнт запасу майже на 40 %. На стійкість рамних систем, як відомо, впливає жорсткість ригелів. У деяких випадках, збільшуючи жорсткість ригелів, можна уникнути посилення колон. Однак часто збільшення жорсткості всього ригеля важко здійсненне або пов'язане з неефективним використанням металу. У цих випадках жорсткість ригеля можна збільшувати тільки біля опор (у вузлах). Як же впливає змінна жорсткість ригелів на значення критичної сили в рамах? При розрахунках рам із збільшеною жорсткістю ригелів біля опор (рам з вутами) жорсткість таких ригелів приймалась у ряді випадків по найменшому її значенню. Було показано [8], як збільшується критичне навантаження в рамах, якщо врахувати зміну жорсткості ригелів по їх довжині.

Висновки

1. В результаті можливості регулювання НДС розрахунковим методом розроблено комбіновані конструкції нової генерації.
2. Удосконалено на основі енерговаріаційного принципу (принципу Лагранжа) узагальнений метод розрахунку комбінованих металевих конструкцій з врахуванням деформованого стану балки

жорсткості.

3. Знайдено єдину розрахункову модель комбінованих систем – шпренгельних і вантових у вигляді балки на пружних опорах, в якій балка моделює балку жорсткості, а пружні опори – систему підкріплення.

4. Такий метод дає можливість встановити деформований стан балки жорсткості, який враховується при визначенні зусиль в елементах комбінованої системи, що забезпечує рівномірність всіх елементів з максимальною економією сталі.

5. 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.

6. Отримано рішення оберненої задачі – раціонального проектування, яка дозволяє одночасно розв'язувати пряму задачу розрахунку (НДС) конструкції.

7. Оцінено ефективність регулювання НДС комбінованих конструкцій, за рахунок якого досягається економія матеріалу порівняно з відомими конструкціями до 27 % із значним спрощенням технології виготовлення.

8. На основі аналізу результатів виконаних досліджень і вивчення впливу деформованого стану балки жорсткості на комбіновані металеві конструкції розроблені пропозиції по удосконаленню 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).

9. Зміна жорсткості ділянок або окремих елементів статично невизначених рамних систем суттєво впливає на їх тримкість у цілому, що необхідно враховувати при підсиленні каркасів будівель і споруд.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Перельмутер, А. В. О влиянии изменения жесткостей на перераспределение усилий в статическинеопределимой системе [Текст] / А. В. Перельмутер // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – № 5. – С. 64-67.
2. 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.
3. Металлические конструкции [Текст] / Е. И. Беленя и др. – М.: Стройиздат, 1991. – 687 с.
 4. Пат. 50014 А Україна, МКИ 7 E04C3/10 B66C17/00. Балкова конструкція [Текст] / Гоголь М. В., Гайда О. М. – № 99127148; заявл. 28.12.99; опубл. 15.10.02. – 2 с.
 5. Пат. 46983 А Україна, МКИ 7 E04C3/10. Прогінна конструкція [Текст] / Гоголь М. В., Гайда О. М., Чайка Б. С. – № 2001031714; заявл. 14.03.01; опубл. 17.06.02. – 2 с.
 6. Пат. 48841 А Україна, МКИ 7 E04C3/08. Шпренгельна балка [Текст] / Гоголь М. В., Чайка Б. С., Гайда О. М., Надала І. В. – № 2001128874; заявл. 21.12.01; опубл. 15.08. 02. – 2 с.
 7. Пермяков, В. О. Проблема напружено-деформованого стану плоских стержневих металевих конструкцій [Текст] / В. О. Пермяков, М. В. Гоголь – Теорія і практика будівництва // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2004. – 4 с.
 8. Бельский, М. Р. Усиление сжатых стержней стальных конструкций под эксплуатационной нагрузкой [Текст]. / М. Р. Бельский. – М.: Стройиздат, – 1984. – 153 с.
 9. Гоголь, М. В. Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14. – № 4.
 10. 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. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 17-19 окт. 2007 – Санкт-Петербург. – 2007.
 11. Гоголь, М. В. Регулювання зусиль у стержневих металевих конструкціях [Текст] / М. В. Гоголь, І. Д. Пелешко, М. Р. Більський // Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку. V Міжнар.наук-техн.конф. УкрНДІпроектстальконструкція. К., 19-22 верес. 2006 р. – К., В-во «Сталь». – 2006.
 12. Гоголь, М. В., Проектування і розрахунок комбінованих металевих конструкцій з регулюванням зусиль [Текст] / М. В. Гоголь, М. Р. Більський, І. Д. Пелешко // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч.тр. / Одес. гос. акад. стр-ва и арх-ры. Ч. 1. – ОДЕСА, 2006.
 13. Gogol, M. New constructive forms and their reliability [Текст] / M. Gogol, I. Peleshko, M. Bilskyj, O. Gajda // Quality and Reliability in Bulding industry. IV International Scientific Conference. 17-19 Oct.. 2006. - Levoca, Slovakia. Technical University of Kosice, 2006.
 14. Гоголь, М. В. Особливості розрахунку будівельних конструкцій із регулюванням зусиль [Текст] / М. В. Гоголь // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК. – 2003. – Вип. 59. – Кн. 1.
 15. Пермяков, В. О. Проблема регулювання напружено-деформованого стану плоских стержневих металевих конструкцій[Текст] / В. О. Пермяков, М. В. Гоголь – Теорія і практика будівництва // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2004.
 16. Пермяков, В. А. Совершенствование стальных стержневых конструкций на основе решения обобщенной задачи оптимального проектирования [Текст]: дис... докт. техн. наук: 05.23.01. – К., 1993.
 17. Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] / за ред. проф. В. О. Пермякова. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2005.
 18. Рекомендації з проектування раціональних металевих несучих конструкцій перекриття та покриття / Укл.: В. О. Пермяков, М. В. Гоголь. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2006.

Надійшла до редколегії 12.06.2011.

Прийнята до друку 23.06.2011.