

УДК 624.071.34

Пропозиції нових сталевих конструкцій із замкнених профілів

Пічугін С.Ф., д.т.н., Чичулін В.П., к.т.н., Чичуліна К.В., к.т.н.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
Україна

Анотація. В статті представлені нові конструктивні рішення арок і ферм із замкнених профілів. Обґрунтовані переваги даного типу конструкцій в порівнянні з існуючими традиційними варіантами конструктивних форм. Наведені результати чисельних розрахунків рамних конструкцій в програмному комплексі.

Аннотация. В статье представлены новые конструктивные решения арок и ферм из замкнутых профилей. Обоснованы преимущества данного типа конструкций по сравнению с существующими традиционными вариантами конструктивных форм. Приведены результаты численных расчетов рамных конструкций в программном комплексе.

Abstract. The article presents new designs of arches and trusses from closed profiles. The advantages of this type of structures over existing traditional forms of design options are proved. The results of numerical calculations of frame structures in the software package are presented.

Ключові слова: ферми, арки, замкнені профілі, легкі сталеві конструкції, комбіновані конструкції.

Стан питання. У сучасній будівельній практиці дедалі більшого застосування набувають легкі сталеві конструкції (ЛСТК). Розглядаючи конструктивні системи з використанням ЛСТК, зазначимо, що це дозволяє реконструювати будівлі, зводячи мансарди, прибудови та надбудови, та швидко зводити нові будівлі з суттєвими перевагами техніко-економічних показників у порівнянні з традиційними способами будівництва. Використовуючи легкі металеві конструкції замість традиційних, можна одержати значний економічний ефект завдяки зниженню навантажень від власної ваги і сейсмічних навантажень, зменшенню транспортних витрат і трудовитрат на монтажі, скороченню термінів будівництва та зниження загальної вартості будови.

Досвід європейських країн довів доцільність застосування конструкцій із профільних труб у малоповерховому будівництві, на жаль, на українському ринку будівельних конструкцій такий досвід не набув загального поширення. Тому питання пошуку нових легких конструкцій з застосуванням профільних труб, альтернативних традиційним конструктивним рішенням, є актуальним питанням для українських проектувальників і будівельників.

На основі існуючого досвіду, представлених нижче переваг досліджуваних конструкцій та перспектив використання їх у масовому цивільному та промисловому будівництві можна припустити, що даний напрямок може стати одним із пріоритетних на українському будівельному ринку. Отже, є необхідність розроблення та популяризації легких конструктивних рішень із трубчастими елементами, враховуючи їхні очевидні переваги та конструкційні особливості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Розв'язання даної проблеми започатковано в низці авторських праць [1–4], в яких представлені конструктивні рішення комбінованих металевих конструкцій ферм та арок, виявлений спектр їх можливого застосування та перспективи. Проведене дослідження надало змогу виявити, що ферми із замкнених гнutoзварних профілів з'явилися ще в 80–90-х роках, про це свідчить певна кількість літературних джерел [5–8]. Розробленню та оптимізації ефективних конструктивних рішень ферм, зокрема, нових конструкцій легких металевих ферм з елементами з розкромлених двотаврів і стиснутими розкосами зі спарених кутиків присвячена робота Попової М. В. [9]; питанням подальших досліджень ферм із квадратних труб, стійких до корозії, присвячена робота Кузнецова А. Ф. [10]. Суттєвий вклад у розвиток конструктивних рішень ферм здійснив Коротких А. В. [11], який представив своє рішення ферм на основі холодногнутих тонкостінних оцинкованих профілів на зсувостійких болтових з'єднаннях та провів їх відповідний експериментальний та чисельний аналіз.

Не розв'язаною раніше частиною проблеми є те, що в рамках загальнодержавної програми енерго- та ресурсозбереження існує необхідність пошуку та розроблення принципово нових конструктивних форм із мінімально можливими показниками матеріаломісткості та вартості.

Задачі дослідження. Як відомо, основні вимоги, які пред'являються до металевих конструкцій, це: відповідність конструктивної форми технології виробництва, функціональним, естетичним та експлуатаційним вимогам; забезпечення необхідної несучої здатності – міцності, стійкості і жорсткості при мінімальній масі конструкцій; досягнення найменшої трудомісткості виготовлення і монтажу; скорочення термінів зведення і досягнення мінімальної вартості каркаса будівлі або споруди. Тому існує постійна необхідність пошуку нових конструктивних рішень, які б цілком відповідали поставленим завданням та характеристикам. Отже, головними задачами проведеного дослідження є отримання оптимальних за показниками конструктивних форм сталевих конструкцій та пошук можливостей збільшення їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Будь-яке удосконалення конструктивної форми направлене на досягнення максимальної ефективності використання конструкції. Досягається це різними прийомами, головними з яких слід вважати: оптимізацію конструктивної форми; застосування попереднього напруження у конструкціях; проектування систем із суміщенням несучих та огорожувальних функцій; концентрацію матеріалу в потужних конструкціях; переважне застосування несучих конструкцій у вигляді розтягнутих поверхонь (мембран) і ниток; широке впровадження просторових систем. При цьому досягається таке рішення конструкції, її геометричних параметрів, марок сталі й розрахунку, при якому споруди повністю відповідають заданим архітектурно-конструктивним вимогам. Звідси впливають і інші напрями вдосконалення будівельних металевих конструкцій [13].

Одним із шляхів удосконалення легких несучих конструкцій, на нашу думку, є використання конструкційних елементів із замкнених профілів, які можуть мати різні перерізи, зокрема, квадратний, прямокутний та овальний. При дослідженні даного питання було виявлено, що традиційно профільні труби виготовляють зі сталі Ст3сп, 09Г2С, а також з нержавіючої сталі. Розглядаючи технологічні особливості виготовлення, зазначимо, що переріз труби – спершу круглий, а згодом деформується різними методами (гарячим і холодним), набуваючи різної необхідної форми.

На основі попередньо проведених досліджень авторами запропоновано нові конструктивні рішення комбінованих металевих конструкцій ферм та арок (рис. 1–4).

На рисунку 1 зображена комбінована металева конструкція ферми з поясами у вигляді прямокутних труб, нижнього поясу – у вигляді вигнутої вниз арки, що працює на розтяг. Така конструкція нижнього поясу є більш економічною, ніж стиснутого поясу. Верхній пояс у вигляді двох стиснутих прямокутних труб і розкріплених пів-арками працює як цілісна система й може виконувати додатково функції огороження. Така конструкційна особливість надає можливість зменшення матеріаломісткості і загалом підвищення ефективності роботи цілої конструкції.

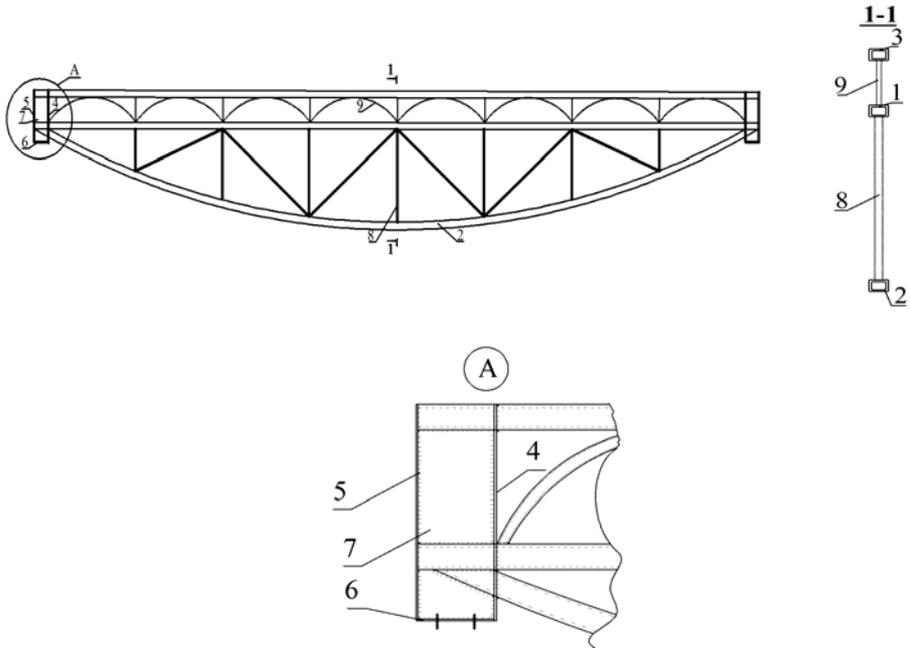


Рис. 1. Комбінована металева конструкція ферми [3]

Позначення: 1, 3 – верхній пояс у вигляді двох прямокутних труб ($\square 120 \div 200$ мм); 2 – нижній пояс із прямокутних труб у вигляді арочного елемента ($\square 120 \div 200$ мм); 4, 5 – опорні ребра із суцільного листа (товщина $t = 6 \div 10$ мм); 6 – опорний лист (товщина $t = 10 \div 20$ мм); 7 – опорна стінка (товщина $t = 8 \div 12$ мм); 8 – решітка ферми ($\square 80 \div 100$ мм); 9 – елемент решітки верхнього поясу і одночасно огорожувальна конструкція (пів-арки $\square 40 \div 60$ мм)

Запропонована комбінована металева конструкція ферми за рахунок спареного верхнього поясу та арочного нижнього поясу, який працює на розтяг, забезпечує багатоваріантність застосування й суттєво зменшує матеріальні витрати. Навантаження від покриття у вигляді поперечних балок (балкова клітка) передається на нижню частину верхнього поясу, що розкріплюється з площини ферми і працює з настилом як просторова система. Верхня частина верхнього поясу, за необхідності, може бути розкріплена з площини трикутними опорами подвійного призначення для комунікацій (трубопроводів тощо). Рекомендоване раціональне застосування запропонованих конструкцій для прогонів 24–36 м.

Розвиток комбінованих конструкцій у вигляді ферм може відбуватися шляхом використання для верхнього поясу просторових трикутних стрижньових елементів, що дасть підвищення стійкості з площини ферми і здешевлення конструкції за масою порівняно з суцільними перерізами.

Відмітимо, що трудомісткість таких конструкцій зростає, тому потрібно оцінювати ці проекти за приведеними витратами.

Представлена ресурсоекономна комбінована конструкція з верхнім та нижнім поясами у вигляді квадратних труб, останній працює як арочний елемент (рис. 2). Існує можливість виконання припорних ділянок таких конструктивних рішень із застосуванням сталевих листів, що забезпечить більшу несучу здатність при дії поперечних сил. В свою чергу, гофрування необхідно виконувати в прогонових ділянках. Необхідно зазначити, що за умови сприймання конструкцією локальних зосереджених навантажень існує необхідність встановлення ребер жорсткості як у традиційних складених балках, так і в приведених вище комбінованих конструкціях, оскільки вони виконують функції забезпечення стійкості стінки.

Приведена комбінована конструкція (рис. 2) є альтернативою звичайним балкам і фермам, яка забезпечує зменшення будівельної висоти (може одночасно виконувати функцію огорожувальної конструкції), транспортних та монтажних витрат тощо.

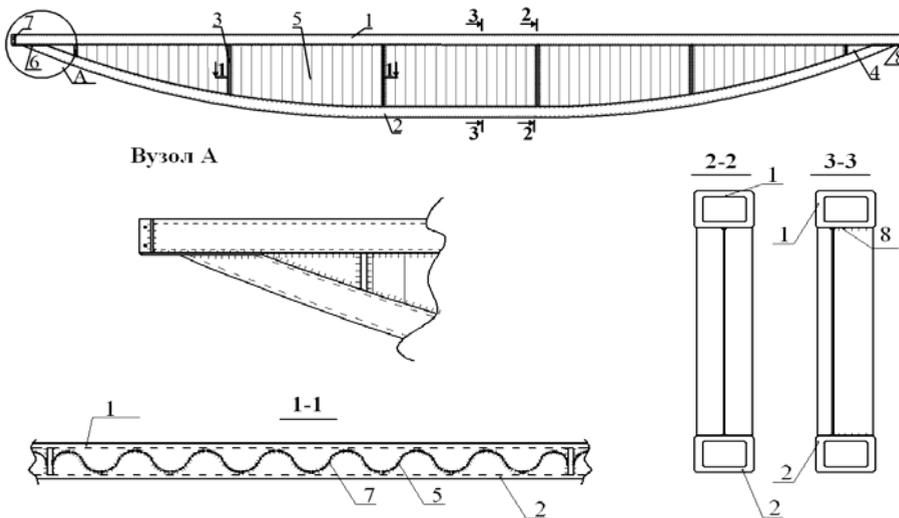


Рис. 2. Ресурсоекономна комбінована конструкція (довжина $L = 8 \div 30$ м) [4]

- Позначення: 1 – верхній пояс із прямокутних труб ($\square 120 \div 200$ мм);
 2 – нижній пояс із прямокутних труб у вигляді арочного елемента;
 3 – ребра (товщина $t = 6 \div 8$ мм); 4 – стінка з суцільного листа
 (товщина $t = 6 \div 8$ мм); 5 – гофрована стінка хвилястого обрису (можлива
 товщина $t = 2 \div 3$ мм); 6 – опорний лист (товщина $t = 8 \div 10$ мм);
 7 – опорне ребро (товщина $t = 10 \div 12$ мм); 8 – зварювання кутове
 (товщина $t_f = 4 \div 6$ мм)

У ході проведеного дослідження представлена конструкція комбінованої металевої арки зі стійками (рис. 3). Таке конструктивне рішення можна використовувати як однопрогонову арочну систему, підсилену системою стійок з оптимальними експлуатаційними показниками, зокрема, з оптимальним співвідношенням висоти і прогону несучої конструкції. Особливістю даного типу конструкцій є використання елементів у вигляді прямокутних труб та консольне спирання арочної системи.

Розглядаючи технологічні переваги такої конструктивної форми, відмітимо, що існує можливість використання зменшених корозійностійких перерізів оптимальної форми (прямокутні труби) для отримання ресурсоекономних конструкцій з мінімальною масою. Окреслюючи етапи виготовлення даної зварної арки зі стійками, необхідним кроком є закріплення на монтажі за допомогою болтів високої міцності. Авторами рекомендовано раціональне застосування комбінованих конструкцій металевих арок зі стійками для прогонів 12–36 м.

Сфера застосування даного типу конструкцій досить різноманітна, зокрема, для офісних та адміністративних споруд, торгівельно-побутових комплексів, ринків, критих стадіонів, виставкових павільйонів, промислових об'єктів, ангарів, цехів тощо.

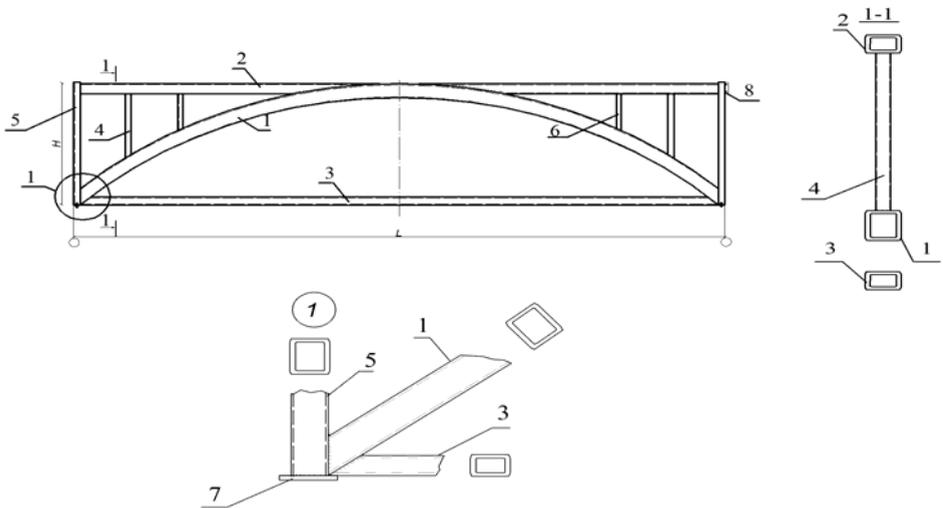


Рис. 3. Комбінована конструкція металевої арки зі стійками

- Позначення: 1 – основний елемент арки – прямокутна труба ($\square 120 \div 200$ мм);
2 – верхній пояс із прямокутної труби ($\square 120 \div 200$ мм); 3 – нижній пояс із прямокутної труби ($\square 80 \div 100$ мм); 4, 5, 6 – стійки ($\square 80 \div 100$ мм);
7 – опорна плита з листа (товщина $t = 6 \div 10$ мм); 8 – опорне ребро з листа (товщина $t = 10 \div 20$ мм)

З метою отримання оптимального за експлуатаційними показниками конструктивного рішення була запропонована комбінована конструкція металевої ферми з просторовим верхнім поясом (рис. 4). Така конструктивна форма може застосовуватись у легких несучих конструкціях покриття з профільованим сталевим настилом. Для такого типу конструкцій прогін може варіюватися від невеликого (24 метра) до суттєво більших (більше 36 метрів). Рекомендований ухил конструкцій може бути стандартним 1,5 %, а також більшим (згідно з завданням на проектування). Існує можливість застосування арочного обрису ферми для відповідних прогонів. Для даного типу конструкцій висота ферми обумовлюється жорсткістю і залежить від прогону, таким чином, розміри просторової частини верхнього поясу визначаються згідно з розрахунком на стійкість в площині та із площини конструкції. Нижній пояс ферми розкріплюється в'язями з кроком згідно з проведеними розрахунками. Розглядаючи особливості комбінованої конструкції ферми з просторовим верхнім поясом, необхідно відмітити, що монтажні частини ферм виконуються відповідно до стандартів на перевезення вантажів. Рекомендується з'єднання монтажних елементів ферм виконувати фланцями на болтах, а також за допомогою зварювання, використовуючи труби більшого діаметру, що значно зменшує металоємність з'єднань. Прогони між фермами виконуються з прокатних профілів і закріплюються згідно з нерозрізною схемою, за рахунок широкого верхнього поясу ферми. Необхідно зауважити, що застосування даного типу конструкцій обумовлюється економічними розрахунками згідно з приведеними витратами в порівнянні з типовими конструкціями покриття.

Розглядаючи в подальшому застосування замкнених перерізів для просторових арочних елементів, представимо арочну просторову ферму (рис. 5, а) та просторову арку (рис. 5, б). Було підтверджено, що за показниками матеріаломісткості арочні покриття більш економічні, ніж балкові системи.

Авторами встановлено, що найвигідніша висота арки знаходиться в межах $1/4$ – $1/6$ прогону. Обрис арки має максимально відповідати кривій тиску. Крива тиску в арці від постійного навантаження має параболічний обрис, тому найчастіше форма арки приймається параболічною. Однак, для зручності виготовлення елементи арок іноді окреслюють по дузі кола. У пологих арках дуга кола майже збігається з параболою; в більш високих арках параболу доцільно замінювати поєднанням дуг кіл різних радіусів.

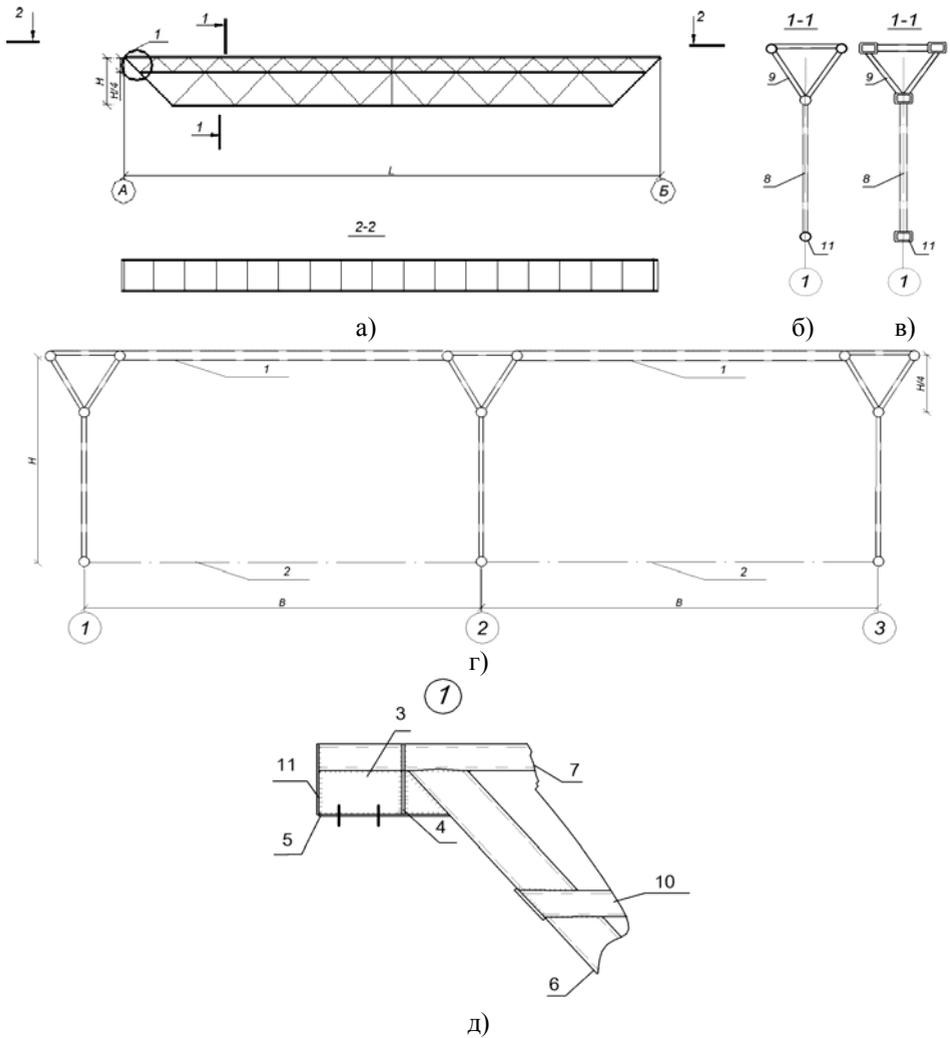


Рис. 4. Комбінована конструкція металевої ферми з просторовим верхнім поясом:
а) загальний вид; б) розріз 1-1, переріз з круглих труб; в) розріз 1-1, переріз з прямокутних труб; г) схема перерізу з прогонами і в'язями; д) вузол 1

Позначення: 1 – прогони; 2 – в'язі; 3 – поздовжнє ребро із суцільного листа (товщина $t = 8 \div 12$ мм); 7, 10 – гілки верхнього поясу у вигляді трьох круглих (прямокутних) труб ($\square 80 \div 100$ мм); 4, 11 – поперечні опорні ребра із суцільного листа (товщина $t = 6 \div 10$ мм); 5 – опорний лист (товщина $t = 10 \div 20$ мм); 6 – елемент решітки (припорний розкіс); 9 – розкоси наскрізного поясу ферми ($\square 80 \div 100$ мм); 8 – елемент решітки ферми ($\square 100 \div 160$ мм).

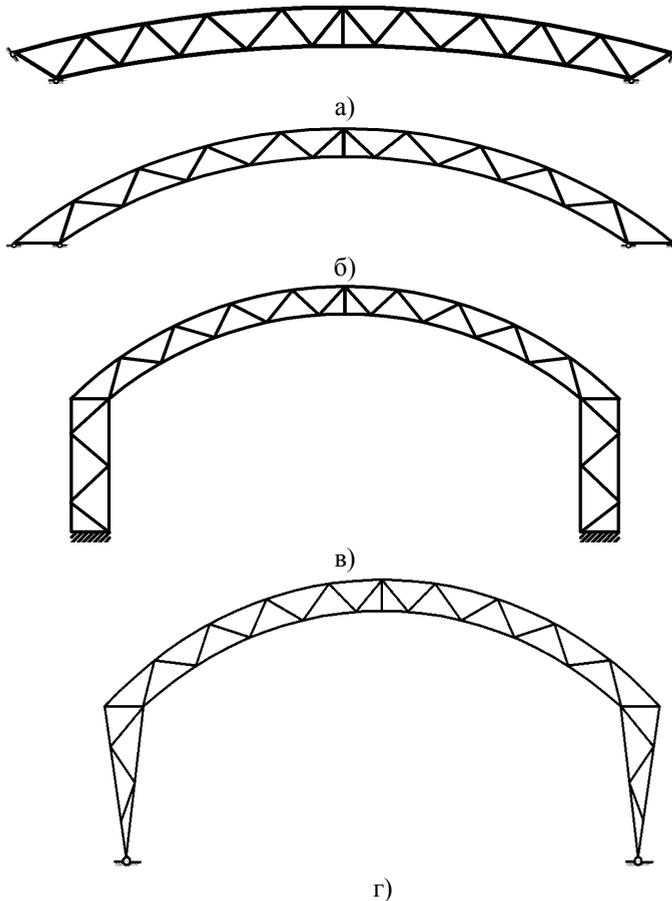


Рис. 5. Сталеві просторові арочні конструкції:
а – арочна просторова ферма; б – просторова арка;
в – безшарнірна просторова рама; г – двошарнірна просторова рама

Особливістю таких конструкцій є те, що висота перерізу арки залежить від прогону і співвідношення між величинами постійного і тимчасового навантаження і приймається для ґратчастих арок у межах $1/30$ – $1/60$ прогону, для суцільних перетинів $1/50$ – $1/80$. Перетин наскрізних арок рекомендується призначати постійної висоти, тобто з паралельними поясами, що найбільш повно відповідає характеру зміни зусиль по довжині. Разом із тим, існує чимало випадків застосування змінних за висотою перерізів, наприклад, серповидних у дво- і тришарнірних аркових покриттях.

Отже, в ході подальшої роботи розглянемо застосування просторових перерізів із замкнених профілів для рамних конструкцій на прикладі традиційних безшарнірних (рис. 5, в) та двошарнірних рам (рис. 5, г). Просторова робота з трьох гілок забезпечує жорсткість у площині та з площини рами. Основні переваги рамних покриттів у порівнянні з балочними – менша вага, велика жорсткість і менша висота ригелів. Традиційно перетини ригелів рам проектують переважно наскрізними при прогонах до 60 м, особливо при ламаному контурі ригелів. Було виявлено, що рамні конструкції ефективні при однаковій жорсткості колон і ригелів. Це дозволяє перерозподіляти зусилля від вертикальних навантажень і значно полегшити ригелі: в цих випадках висота гратчастих ригелів може бути прийнята такою, що дорівнює $(1/12 - 1/20)$ прогону.

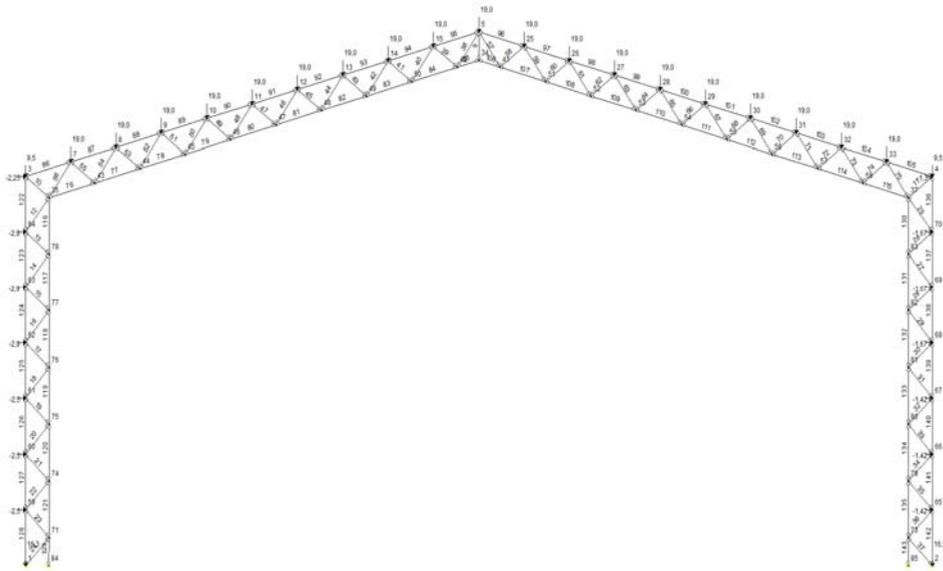
В результаті проведеного дослідження було виявлено, що при застосуванні варіанта двошарнірної просторової рами (рис. 5, г) можливо зменшити вартість споруди за рахунок зменшення розміру фундаменту.

Наступним кроком проведеного дослідження є розгляд прикладу модифікації наскрізної рами. Для даного розрахунку (за допомогою програмного комплексу SCAD) будемо використовувати П-подібну раму з похилим ригелем.

Представлено схему рами з навантаженням і нумерацією вузлів і стрижнів (рис. 6, а). та епюру поздовжніх сил (рис. 6, б). Після встановлення розтяжки у гребеновому вузлі та розпірки у карнизних вузлах розрахунок рами було виконано вдруге.

Схема рами і епюра поздовжніх сил представлені на рис. 7. Розглядаючи результати проведеного розрахунку, відмітимо, що при модифікації рами зниження поздовжніх сил в елементах склало від 20 до 250 відсотків. Досліджено, що особливо суттєво зменшились зусилля у стійках. Отриманий результат надасть можливість відповідної економії матеріалу при проектуванні.

Зростання трудомісткості виготовлення просторових конструкцій перекривається зменшенням матеріаломісткості конструкцій, що дає можливість отримувати більш економічні конструкції.



а)



б)

Рис. 6. Результати чисельного розрахунку рамної конструкції
за програмою SCAD:
а – схема рами; б – епюра поздовжніх сил

Висновки

В результаті проведеного дослідження представлена низка конструктивних рішень легких комбінованих металевих ферм та арок, які мають широкий спектр застосування у будівництві. Перевагами запропонованих рішень є легкість, індустріальність та велика жорсткість. Проведені чисельні розрахунки рамних конструкцій дозволили довести економічність даних конструктивних рішень і відслідкувати суттєве зменшення зусиль у стійках.

Література

- [1] Пічугін С. Ф. Нові конструктивні системи легких комбінованих ферм / С. Ф. Пічугін, В. П. Чичулін // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць / НУВГП. – Вип. 31. – Рівне, 2015. – С. 486–491.
- [2] Пічугін С. Ф. Нові ресурсоекономічні конструкції з профільних труб / С. Ф. Пічугін, В. П. Чичулін, К. В. Чичуліна // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць / НУВГП. – Вип. 32. – Рівне, 2016. – С. 243–248.
- [3] Пат. 98331 Україна, МПК (2006) Е 04 С 3/02. Комбінована металева конструкція ферми / Пічугін С. Ф., Чичулін В. П., Чичуліна К. В.; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u201411960; заявл. 05.11.2014; опубл. 27.04.2015. – 4 с.
- [4] Пат. 98332 Україна, МПК (2006) Е 04 С 3/02. Ресурсоекономічна комбінована металева конструкція / Пічугін С. Ф., Чичулін В. П., Чичуліна К. В.; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u201411961; заявл. 05.11.2014; опубл. 27.04.2015. – 4 с.
- [5] Галатенко В. А. Исследование металлических ферм из прямоугольных труб, сваренных из прокатных уголков : Автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Галатенко. – Новосибирск, 1982. – 22 с.
- [6] Гарф Э. Ф. Исследования конструктивной прочности сварных узлов и элементов из гнутых профилей замкнутого сечения : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Э. Ф. Гарф. – Киев, 1970. – 19 с.
- [7] Металлические конструкции. В 3-х т. : учебник для студ. строит. спец. вузов и аспирантов. Т. 2. Конструкции зданий / [В. В. Горев и др.] ; ред. В. В. Горев. – 3-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2004. – 528 с.
- [8] Новые формы легких металлических конструкций : коллективная монография / ЦНИИПСК им. В.А. Кучеренко : АО «Монтажспецстрой»; фирма «Стальстрой». – М. : ИНПА, 1993. – 80 с.

- [9] Попова М. В. Новые конструкции легких металлических ферм с элементами из раскrojенных двутавров : Автореф. дис. ... канд.техн.наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / М. В. Попова. – Владимир, 1999. – 25 с.
- [10] Кузнецов А. Ф. Фермы из квадратных труб на ребро без фасонки, устойчивые против коррозии / А. Ф. Кузнецов, В. А. Кузнецов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – № 16 (233). – Из-во ЮУрГУ, 2011. – С. 7–10.
- [11] Коротких А. В. Фермы из тонкостенных оцинкованных профилей с перекрестной решеткой на сдвигустойчивых соединениях : Автореф. ... дис. канд. технич. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»/ А. В. Коротких. – Красноярск, 2012. – 22 с.
- [12] Павлов А. Б. Методологические основы современной системы принципов формoобразования строительных конструкций / А. Б. Павлов, В. М. Фридкин // Academia. Архитектура и строительство / МГСУ. – 2010. –№ 1. – С. 70–73.
- [13] Файбишенко В. К. Металеві конструкції: навчальний посібник для вузів [Електронний ресурс] / В. К. Файбишенко. – Стройиздат, 1984. – Режим доступу: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-108-metallokonstrukcii/1.htm> – Назва з екрана.

Надійшла до редколегії 07.11.2016 р.