

УДК 624.071–96

Дослідження елементів балок із профільованою стінкою

Пічугін С.Ф., д.т.н., Чичуліна К.В.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
Україна

Анотація. Запропонована нова конструктивна форма сталеві балки з профільованою стінкою. Проведений аналіз результатів експериментальних випробувань фланцевих вузлів балок із поперечно профільованою коробчатою стінкою. Виявлена залежність для знаходження розрахункових параметрів профільованої стінки під навантаженням. Отримана система фланцевого з'єднання балок, оптимального за несучою здатністю і критеріями рівнонадійності елементів вузлів.

Аннотация. Предложена новая конструктивная форма стальной балки с профилированной стенкой. Проведен анализ результатов экспериментальных испытаний фланцевых узлов балок с поперечно профилированной коробчатой стенкой. Выявлена зависимость для нахождения расчетных параметров профилированной стенки под нагрузкой. Получена система фланцевого соединения балок, оптимального по несущей способности и критериями равнонадежности элементов узлов.

Abstract. The new structural form of the steel beam is offered with the corrugated web. Of experimental tests results the analysis of beams flange knots with the corrugated box-type web. Dependence of calculation parameters of the corrugated web on-loading is educed. The system of optimal on bearing strength and by the criteria of equal reliability of knots elements of beams flange connection is got.

Ключові слова: сталева балка з профільованою стінкою, фланцеві з'єднання, надійність сталевих конструкцій

Стан питання. В умовах сучасного будівництва зниження матеріаломісткості з одночасним підвищенням надійності є однією з пріоритетних задач, які ставлять перед собою будівельники. З появою в нашій країні роботизованих зварювальних ліній з'явилась можливість виготовлення конструкцій з гофрованими стінками (балок, колон, арок). На даному етапі розвитку будівельних конструкцій актуальним питанням є поява нових та удосконалення існуючих конструктивних форм тонкостінних балок. Одним із шляхів підвищення ефективності конструкцій є використання балок з гофрованими стінками, які забезпечують зменшення витрат сталі, трудомісткості під час виготовлення та монтажу суттєво підвищують надійність на етапах проектування та експлуатації. Використання балок із гофрованими стінками повинні передувати як експериментальні, так і теоретичні дослідження їх напружено-деформованого стану. За умови відсутності в вітчизняних нормах методики розрахунку балок із гофрованими стінками дослідження такого типу конструкцій є досить актуальною темою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Експериментальним дослідженням балок із гофрованою стінкою трикутного обриса присвячені роботи Г.М. Острікова, Ю.С. Максимова, В.В. Долинського [4]; випробування балок із синусоїдальною гофрованою стінкою були проведені М.В. Лазнюком [2], зарубіжними науковцями А.В. Alisibramulisi [12], X. Wang [13] виконані експериментальні дослідження вузлів балок з одинарною гофрованою стінкою трапецієподібного обриса з симетричним кроком гофрів.

Не розв'язаною раніше частиною проблеми є те, що запропонований тип балкових конструкцій взагалі не застосовувався і, відповідно, в державних нормах відсутні засади для проектування та оцінювання несучої здатності балок із трапецієподібною стінкою та їх з'єднань. Комплексна оцінка надійності надає можливість отримати оптимальну конструкцію без зниження загального рівня надійності.

Задачі дослідження. Шляхом експериментального дослідження визначити характер роботи опорних вузлів балок з поперечно гофрованою трапецієподібною стінкою під дією статичного навантаження. Виконати порівняння результатів аналітичного розрахунку та експериментальних випробувань у найбільш небезпечних місцях представленого типу конструкцій. Виявити залежності, що характеризують напружено-деформований стан балок коробчастого перерізу з несиметрично-трапецієподібною профільованою стінкою та їх з'єднань, а також дозволяють отримати розрахункові параметри для проектування балок із профільованою стінкою. Провести аналіз надійності складних вузлів на основі аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, врахування роботи окремих елементів та їх взаємозв'язку, а також визначення значущості окремих елементів та її врахування при отриманні конструкцій з мінімальною матеріаломісткістю.

Виклад основного матеріалу. Запропоновано нове конструктивне рішення балок коробчастого перерізу з нерівномірним кроком гофрів (рис. 1,а). Гофри стінки мають різні кроки, отже вони розташовані рідше подібно до поперечних ребер складених балок, що відрізняє їх від інших тонкостінних балок. Для розподілення зусиль від опорного ребра до нижньої полиці в нижній частині приварюється додаткове ребро.

Вперше були проведені експериментальні дослідження серії зразків балок коробчастого перерізу з нерівномірним кроком гофрів у складі фланцевого вузла з проміжною двотавровою вставкою (В1, В2) прогоном $L = 2220 \text{ мм}$ (рис. 1,а) [5, 6]. Висота та товщина подвійної профільованої стінки становить $h_w = 500 \text{ мм}$ та $t_w = 0,7 \text{ мм}$ ($2t_w = 1,4 \text{ мм}$), ширина та товщина полиці відповідно $b_f = 100 \text{ мм}$, $t_f = 10 \text{ мм}$. Довжина довшої та коротшої ділянок

гофрів профільованої стінки дорівнює $a_{1,max} = 60 \text{ мм}$ та $a_{1,min} = 30 \text{ мм}$, а довжина похилої ділянки визначається розміром $a_2 = 54 \text{ мм}$. З'єднання між собою опорних ребер здійснювалося за рахунок дванадцяти болтів діаметром 20 мм (М20) класу міцності 8.8. В ході проведення експерименту до вузлів В1 та В2 навантаження прикладалося поступово по 5 кН за однопрогоною розрахунковою схемою з шарнірним обпиранням з боків та зосередженою силою посередині прогону. На кожному з експериментальних конструкцій здійснювалося короткочасне зосереджене навантаження до втрати несучої здатності балок. Під час експерименту досліджувався характер руйнування в пружній та пружнопластичній стадіях роботи конструкцій.

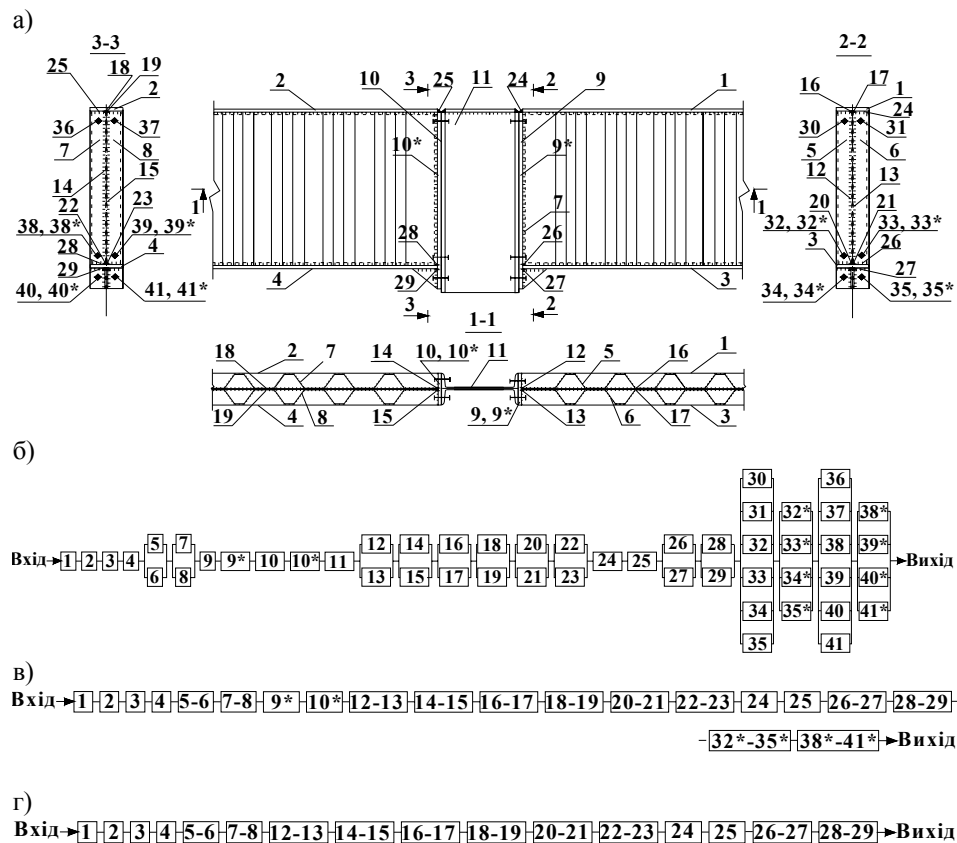


Рис. 1. Опорний фланцевий вузол примикання балок із профільованою стінкою: а – конструктивна схема з визначенням головних елементів вузла; б – розгорнута схема послідовно паралельного з'єднання елементів вузла; в – спрощена схема головних елементів вузла; г – схема найбільш напружених елементів вузла

Після закінчення експериментального дослідження були отримані дані про характер роботи профільованих відсіків. У пружній стадії профільована стінка відповідає критеріям плоских перерізів, за винятком стінки біля верхньої частини двотавра, де спостерігається параболічна залежність навантажень і нормальних напружень, а при наближенні навантаження до руйнівного нелінійність напружень зростає (рис. 2, а, б).

Аналіз розподілу нормальних напружень показав, що робота з'єднання під навантаженням в елементах балки полиці, а також стінки в зоні біля полиці відповідають ділянкам роботи сталі під навантаженням у зонах пружної роботи.

Слід зазначити, що дотичні напруження для таких конструкцій нагадують епюри, характерні для традиційних двотаврів, за винятком нижньої частини стінки, в якій напруження монотонно зменшуються (вплив поперечних сил спадає). Також відзначимо деяку нелінійність на рівні середньої осі балки. Такі особливості роботи можна пояснити досить великою гнучкістю стінки та невеликою депланацією відповідних перерізів.

Через перерозподіл зусиль у стінці балки були зруйновані вертикальні шви біля фланців (рис. 2, г) та горизонтальні шви з'єднання стінки і полиці (рис. 2, д, е), а також деякі ділянки стінки. У той же час значення напружень у полиці не досягають граничних значень.

У загальному вигляді робота балки за прогинами відповідає теоретичним передумовам (рис. 2, в). Графіки роботи двох зразків (В1, В2) під навантаженням наближаються до теоретичних з невеликим відхиленням від нормативних. Графічне відображення прогинів на ділянках пружної роботи відповідає лінійному закону, а на стадіях, близьких до руйнування, проявляються нелінійні залежності деформацій від навантаження. В процесі руйнування зварних швів спостерігається невелике падіння навантаження до 5÷7 % при продовженні зростання деформацій.

Для зразків В1 та В2 (рис. 1, а) детально проводилось співставлення теоретичних значень нормальних напружень, які були розраховані за раніше розробленими рекомендаціями [11], з результатами експериментального випробування вузлів балок при навантаженні 30 кН (близькому до критичного рівня). За допомогою лабораторного експерименту була виконана практична оцінка запропонованої методики розрахунку.

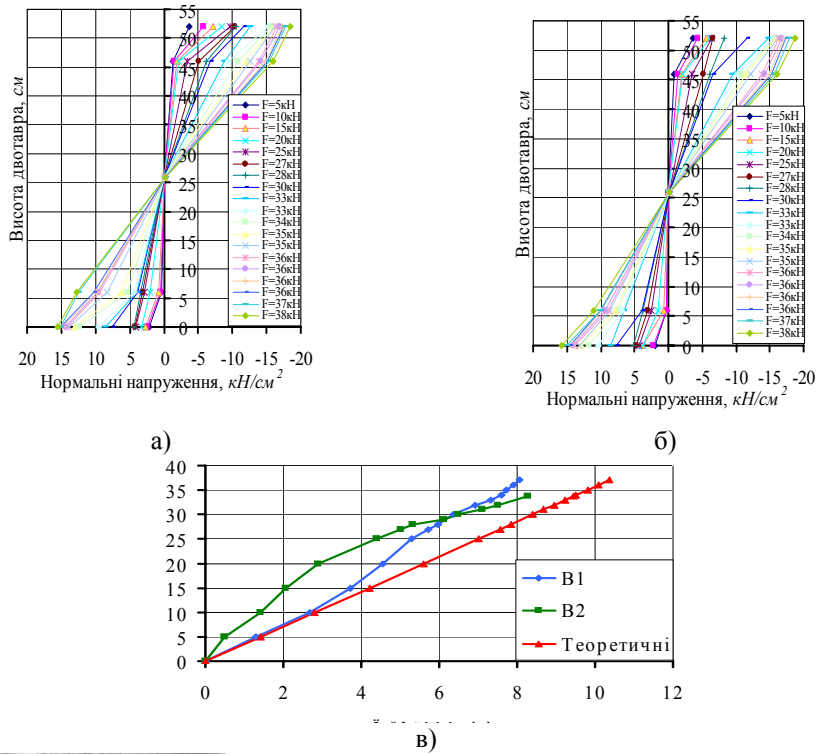


Рис. 2. Результати експериментального дослідження фланцевих вузлів балок із профільованою стінкою:

- а – нормальні напруження в перерізі руйнування біля фланців В1;
- б – нормальні напруження в перерізі руйнування біля фланців В2;
- в – залежність прогинів від діючого навантаження;
- г – розрив зварного шва на ділянках біля фланців;
- д, е – змінання та відрив стінки біля нижнього поясу

Шляхом аналізу експериментальних та теоретичних напружень у перерізах біля фланців (1-1; 2-2; 3-3; 4-4) (рис. 3) було виявлено, що експериментальні нормальні напруження, отримані при випробуваннях зразків, близько співпадають з теоретичними значеннями напружень. У середньому

розбіжності нормальних напружень сягають до 10 %, на ділянках стінки (розтягнута та стиснута зони), наближених до полиць. Співставлення значень напружень у полицях показало невелику розбіжність з теоретичними, в середньому близько 3 % – 5 %. Досить велика гнучкість і як наслідок підвищена деформативність призводить до деякої розбіжності результатів розподілення нормальних напружень у поперечних перерізах балок, особливо в зонах, близьких до нейтральної, де різниця є невеликою і досягає $0,01 \text{ кН/см}^2 - 0,1 \text{ кН/см}^2$. Вивчення попереднього досвіду дослідження тонкостінних конструкцій [1, 3] підтвердило можливість розкиду напружень у стінці.

У національних нормах відсутні, а в європейських недостатньо представлені методи розрахунку і визначення напружено-деформованого стану даного типу конструкцій. Тому була розпочата розробка інженерної методики розрахунку балок коробчатого перерізу з несиметрично-трапецеїдальною профільованою стінкою. Вона була заснована на твердженні, що відповідно до експериментальних розрахунків нормальні напруження в стінці більш суттєво зростають на ділянках, наближених до з'єднання стінки і полиці.

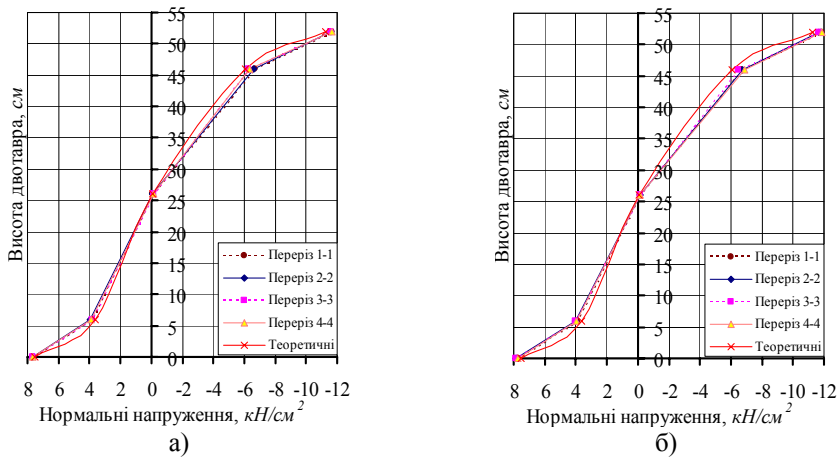


Рис. 3. Порівняння експериментальних та теоретичних нормальних напружень зразків при навантаженні 30 кН : а – V1; б – V2

Досить велика кількість точних та наближених рішень визначення розрахункових параметрів пластин існує в теорії пружності. Для подвійної профільованої стінки трапецеїподібної конфігурації такі задачі раніше не вирішувались. Для їх вирішення пропонується представити таку стінку у вигляді ортотропної пластинки з заданою висотою профілю та повним кроком профільованого листа.

Головною особливістю розрахунку профільованої стінки є заміна реальної деформованої форми на апроксимуючу. Отримується крива, яка описується функцією, що в першу чергу залежить від параметрів переміщення. За умови знайдення переміщень існує можливість одержання максимально близьких значень напружень. В результаті розв'язку диференційного рівняння представляється вихідна функція для узагальненої моделі балки коробчастого перерізу з подвійною профільованою стінкою трапецієдального обрису. Вихідна та отримана функція, що розраховується за допомогою обчислювального комплексу MathCAD 14, має достатньо малу розбіжність. У подальшому показана можливість використання представлених залежностей для аналітичних розрахунків характеристик стінки балки [11].

При проектуванні вузлів балок не враховується їх складність і багатоелементність [8]. Для отримання більш надійних та економічних вузлів необхідно враховувати всі складові внутрішніх та зовнішніх факторів роботи цих конструкцій. В реальні вузли конструкцій закладається надлишковий резерв надійності одних елементів і недостатній рівень надійності інших елементів вузлів.

Отримання рівнонадійних конструкцій вузлів балок із профільованою стінкою є досить актуальною проблемою. З цією метою роботу складних вузлів балок можна наближено представити у вигляді багатоелементних схем з послідовними і паралельними з'єднаннями елементів. Для цих схем при визначенні імовірнісної безвідмовної роботи враховується резервування елементів у паралельних з'єднаннях, кореляційні зв'язки між роботою окремих елементів. Для багатоелементних конструкцій, які представлені у вигляді послідовних з'єднань, імовірність відмови визначається за одним або декількома найбільш «слабкими» елементами. Треба зазначити, що при зростанні кількості статистично незалежних елементів надійність вузла знижується [9].

Для того, щоб представити опорний фланцевий вузол примикання балок із профільованою стінкою у вигляді логіко-імовірнісної схеми послідовно-паралельних елементів, в першу чергу необхідно детально розглянути елементи запропонованого вузла та характер їх роботи (рис. 1): 1 – верхня полиця двотавра правого відсіку балки (стиск); 2 – верхня полиця двотавра лівого відсіку балки (стиск); 3 – нижня полиця двотавра правого відсіку балки (розтяг); 4 – нижня полиця двотавра лівого відсіку балки (розтяг); 5, 6 – стінка з профільованого листа правого відсіку балки; 7, 8 – стінка з профільованого листа лівого відсіку балки; 9 – фланець правого відсіку балки (зминання); 10 – фланець лівого відсіку балки (зминання); 9* – фланець правого відсіку балки (стійкість); 10* – фланець лівого відсіку балки (стійкість); 11 – двотавр (зминання); 12, 13 – вертикальні зварні шви прик-

ріплення стінки до фланця правого відсіку балки (зрізання); 14, 15 – вертикальні зварні шви прикріплення стінки до фланця лівого відсіку балки (зрізання); 16, 17 – горизонтальні шви з'єднання стінки та верхньої полиці правого відсіку балки (зрізання); 18, 19 – горизонтальні шви з'єднання стінки та верхньої полиці лівого відсіку балки (зрізання); 20, 21 – горизонтальні шви з'єднання стінки та нижньої полиці правого відсіку балки (зрізання); 22, 23 – горизонтальні шви з'єднання стінки та нижньої полиці лівого відсіку балки (зрізання); 24 – горизонтальні шви з'єднання верхньої полиці та фланця правого відсіку балки (зрізання); 25 – горизонтальні шви з'єднання верхньої полиці та фланця лівого відсіку балки (зрізання); 26, 27 – горизонтальні шви з'єднання нижньої полиці та фланця правого відсіку балки (зрізання); 28, 29 – горизонтальні шви з'єднання нижньої полиці та фланця лівого відсіку балки (зрізання); 30, 31, 32, 33, 34, 35 – болти правого відсіку балки (зрізання); 32*, 33*, 34*, 35* – болти правого відсіку балки (розтяг); 36, 37, 38, 39, 40, 41 – болти лівого відсіку балки (зрізання); 38*, 39*, 40*, 41* – болти лівого відсіку балки (розтяг). Розрахунок імовірності відмови в даному випадку враховує різний напружено-деформований стан елементів вузла.

У вигляді послідовного з'єднання представимо верхні та нижні полиці двотавра, що працюють на стиск і відповідно на розтяг, фланець, який працює на стійкість і зминання, двотавр, що буде розраховуватись на дію згинального зусилля. В формі паралельного з'єднання були зображені наступні елементи: стінки балок та здебільшого зварні шви, які працюють на зрізання, а також болти, які працюють на розтяг та зрізання.

Приведемо спрощену схему послідовно-паралельного з'єднання елементів вузла до узагальненого вигляду (рис. 1, в) шляхом представлення в формі єдиного з'єднання дубльованих елементів системи та винятком елементів з більшою несучою здатністю. При реальному обчисленні імовірності відмови елементів можна виключити малонапружені елементи вузла, що спрощує схему (рис. 1, г). До малонапружених елементів можна віднести: стінки балок, фланець, полиці, з'єднувальні зварні шви та інші не менш важливі елементи конструкції (рис. 1, а), які можна відобразити за допомогою схеми логічного зв'язку (рис. 1, б).

Розроблена методика знаходження оптимальних вузлів із заданим рівнем надійності. Для отримання економічних вузлів із заданою надійністю з врахуванням пластичної роботи, випадкових характеристик матеріалу та навантаження існує можливість визначення критеріїв значущості і внеску кожного елемента в роботу вузла як системи. Після цього можна регулювати існуючі резерви вузла за рахунок зміни перерізів елементів без зниження загального рівня надійності конструкції.

З метою досягнення більш економічної (оптимальної) системи вузла існує можливість вирівнювання внесків за допомогою зменшення перерізів. З цією метою визначають елемент з найменшою характеристикою безпеки β (величина, яка визначає імовірність відмови або безвідмовної роботи через функцію нормального розподілу, $\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\hat{R}^2 + \bar{S}^2}}$), щоб в подальшому шля-

хом зменшення характеристики безпеки $\Delta\beta$ (в тих елементах, в яких це можливо зробити) привести характеристику безпеки до мінімального рівня. Визначаючи при цьому імовірність відмови, а також імовірність безвідмовної роботи, внесок і питомий внесок кожного елемента в надійність для вже вирівняної таким чином системи. Внаслідок цього методом ітерацій були отримані нові значення, математичні очікування для тих елементів в яких були змінені характеристики безпеки (рис. 4, б).

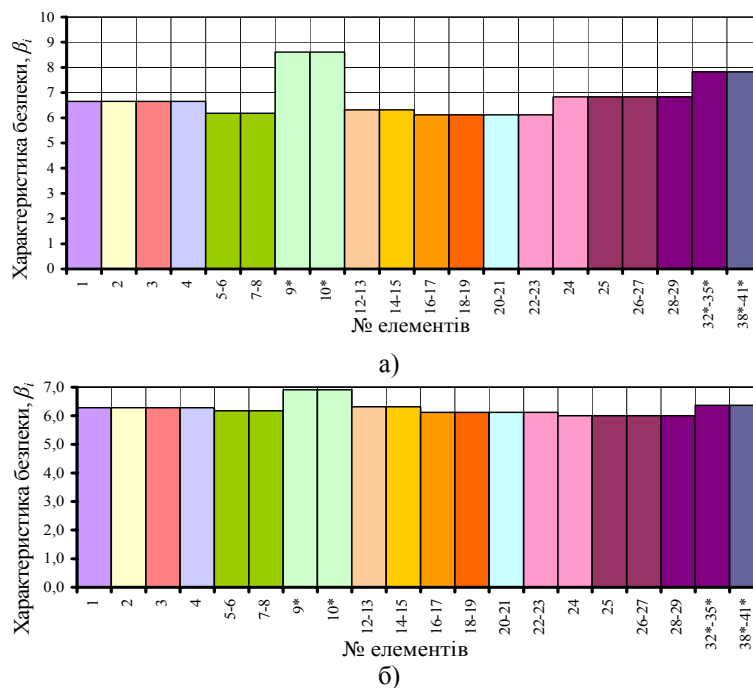


Рис. 4. Діаграма характеристик безпеки елементів опорного вузла:
а –спрощеної схеми головних елементів; б – діаграма характеристик безпеки оптимізованої системи

З метою зменшення матеріаломісткості для досягнення оптимальної економії матеріалу та отримання нових змінених перерізів елементів вузла [10] зі збереженням загального рівня надійності виявлена можливість зменшення перерізів фланців правого та лівого відсіків балки ($b_f = 80$ мм;

$t_f = 6$ мм) та змінений клас болтів на 6.6, а також змінені довжини та катети швів ($l_w = 8$ см; $k_f = 10$ мм) (горизонтальні шви з'єднання нижньої полиці та фланцю лівого та правого відсіків балки; горизонтальні шви з'єднання верхньої полиці та фланця лівого та правого відсіків балки).

Висновки

Запропонована нова конфігурація полегшених сталевих балок із профільованою стінкою, що мають трапецеїдальний коробчастий профіль та нерівномірний крок гофрів. Експериментальні та теоретичні дослідження дали змогу виявити ряд особливостей роботи таких конструкцій, підтвердити можливість застосування їх у будівництві та розробити достовірну методику розрахунку, яка б спростила складні математичні обчислення. Дані напружень відповідають попередньо розрахованим значенням відповідно до запропонованої методики. Отримані результати випробувань виявили найбільш небезпечні та відповідальні елементи вузла. Узгоджене рішення, що надає можливість отримати розрахункові параметри для конструювання балок з профільованою стінкою. Представлена методика знаходження оптимальних вузлів із заданим рівнем надійності, що дозволяє регулювати існуючі резерви вузла за рахунок зміни перерізів елементів без зниження загального рівня надійності конструкції.

Література

- [1] Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: автореф. дис. на соискание науч. степ. канд. техн. наук: 05.23.01 / И.В. Астахов; С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Санкт-Петербург, 2006. – 21 с.
- [2] Лазнюк М.В. Балки с тонкою поперечно гофрованной стенкой при действии статического навантажения: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук: 05.23.01 / М.В. Лазнюк; Київ. нац. ун-т буд-ва та архіт. – К.: КНУБА, 2006. – 18 с.
- [3] Марцинкевич Д.В. Исследование прочности, жесткости и местной устойчивости вальцованных профилированных листов с поперечно рифлеными гранями: дис. на соискание науч. степ. канд. техн. наук: 05.23.01 / Д.В. Марцинкевич; Уральский гос. техн. ун-т. – Екатеринбург: УГТИ., 1995. – 194 с.
- [4] Остриков Г.М. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой / Г.М. Остриков, Ю.С. Максимов, Долинский В.В. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. – № 1. – С. 66 – 70.
- [5] Пічугін С.Ф. Випробування вузлів балок із профільованою стінкою / С.Ф. Пічугін, К.В. Чичуліна // Зб. наук. Праць (галузеве машино буд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 24. – С. 61 – 64.

- [6] Пічугін С.Ф. Експериментальні дослідження балок з профільованою стінкою / С.Ф. Пічугін, К.В. Чичуліна // Вісник ДонНАБА: зб. наук. пр. – Макіївка: ДонНАБА, 2009 – Вип. 78. – С. 161 – 165.
- [7] Пічугін С.Ф. До розрахунку сталевих балок з подвійною профільованою стінкою / С.Ф. Пічугін, К.В. Чичуліна // Вісник ОДАБА: зб. наук. пр. – Одеса: ОДАБА, 2009 – Вип. 34. – С. 41 – 45.
- [8] Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності вузлів статично невизначених рам / С.Ф. Пічугін, О.В. Семко, К.В. Чичуліна // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Вип. 21. – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – С. 65 – 70.
- [9] Пічугін С.Ф. Фланцеві вузли сталобетонних рам / Пічугін С.Ф., Семко О.В., Чичуліна К.В. // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип. 70. – Київ: НДІБК, 2008. С. 217 – 221.
- [10] Пічугін С.Ф. Вирівнювання імовірнісних параметрів елементів вузлів з урахуванням критерію рівнонадійності / О.В. Семко, К.В. Корж // Ресурсо-економічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2009 – Вип. 18. – С. 272 – 279.
- [11] Пічугін С.Ф. Розрахункові параметри балки з коробчастою профільованою стінкою трапецеїдального обриса/ С.Ф. Пічугін, К.В. Чичуліна // Современные конструкции из металла и древесины: Сб. науч. труд. – Одесса: ОГАСА, 2010 – Вип. 14. – С. 187 – 191.
- [12] Alisibramulisi A.B. Analisis of corrugated web beam to column extended end plate connection using lusas software / Alisibramulisi A.B. University Teknologi Malaysia. Malaysia. 2006. – 63 p.
- [13] Wang X. Behavior of steel members with trapezoidally corrugated webs and tubular flanges under static loading / Wang X. Drexel University. Drexel. 2003. – 192 p.

Надійшла до редколегії 15.06.2010 р.