

УДК 624.071.34

Розвиток конструктивних рішень сталевих балок із гофрованою стінкою

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. З метою розвитку конструктивних рішень балок із гофрованою стінкою представлена серія ефективних балочних тонкостінних конструкцій. В статті наведені результати проведеного аналізу конструктивних особливостей та дослідження роботи нового типу сталевих балок із гофрованою стінкою.

Аннотация. С целью развития конструктивных решений балок с гофрированной стенкой представлена серия эффективных балочных тонкостенных конструкций. В статье приведены результаты проведенного анализа конструктивных особенностей и исследования работы нового типа стальных балок с гофрированной стенкой.

Abstract. The series of the effective beam thin-walled constructions are presented with the purpose of development of structural decisions concerning beams with the corrugated web. In the article the results of the conducted analysis of structural features are cited, as well as the behavior researches of a new type of steel beams with the corrugated web.

Ключові слова: сталева балка, гофрована стінка, обрис.

Стан питання. В умовах сьогодення все більше набувають популяризації легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК), впроваджувані на Заході як «Light Gauge Steel Framing». За рахунок своїх переваг (невеликої питомої ваги, швидкості та технологічності будівництва, економічності) такі конструкції активно використовують при будівництві котеджів, малоповерхових житлових та громадських будівель (готелі, торговельні комплекси, адміністративні установи, автозаправні станції), промислових цехів, ангарів. Крім того, ЛСТК мають досить широке застосування при реконструкції будівель, а саме при зведенні прибудов і надбудов, мансардних поверхів тощо. Одним із представників ЛСТК є балки з гофрованою стінкою, які вже багато років використовуються на території Австрії, Німеччини, Швеції, Франції, Японії, Нідерландів та за рахунок великої кількості переваг, зокрема низьких вагових параметрів, поступово завоювали першість на ринку будівельних конструкцій багатьох європейських країн. Останні п'ять років в Україні з'явилася можливість виготовлення такого типу конструкцій, які відрізняються, в порівнянні з традиційними балочними конструкціями, більшою жорсткістю та стійкістю до деформацій, а зосередження металу в полицях за рахунок збільшення гнучкості стінки та виключення ребер жорсткості призводить

до економії матеріалу до 45 %, що є суттєвим фактором при виборі ефективних конструкцій. В нашій країні стрімкого розвитку дістали розроблені за австрійською технологією Zeman балки з хвилястою гофрованою стінкою, але нещодавно з'явився їх конкурент – це нова лінія гофро-балок спільного виробництва Італії та Китаю, яка виготовляє аналоги таких конструкцій. Отже, поява нових конструктивних рішень, урізноманітнення форм і перерізів таких конструкцій є досить актуальним питанням. Враховуючи відсутність в існуючих нормах проектування рекомендацій щодо розрахунку такого типу конструкцій, головним питанням на сьогодні є розроблення інженерної методики для впровадження в новий ДБН.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Велика кількість вітчизняних науковців у свій час займалися дослідженням балок із тонкими гофрованими стінками (БТГС), до останніх з них можна віднести роботу Лазнюка М. В. [1], який розробив інженерну методику розрахунку міцності та стійкості поперечно гофрованих стінок балок із різними формами та параметрами гофрів із подальшими експериментальними дослідженнями. Дослідженню балок із хвилястими стінками присвячена робота І. С. Рибкіна [2], де він пропонує в таких конструкціях улаштовувати жорсткіші гофри на опорних ділянках і зменшувати гофрування до середини прогону. В дисертаційній роботі А. Н. Кретиніна [3] доведена можливість застосування балок, пояси яких виготовлені з холодногнутих профілів, а стінки – з оцинкованого профільованого листа. В праці Егорова П. І. [4] шляхом представлення складеного двотавра з безперервно гофрованою стінкою тонкостінним просторовим стрижнем аналітично представлено його напружений стан для трикутного та трапецієвидного профілів гофрів. В науковій роботі Кудрявцева С. В. [5] розглянуто балки з гофрованою стінкою, послаблені круговими отворами, та розроблена інженерна методика для такого типу конструкцій. О. С. Полторадневим [7] отримано нове конструктивне рішення комбінованої балки, яка об'єднує гофровані елементи на опорах та плоскі елементи в середині прогону, і доведена раціональність та ефективність таких конструкцій. До останніх зарубіжних публікацій, в яких висвітлені проблеми проектування та розрахунку БТГС, можна віднести роботи Е.У. Sayed-Ahmed [8], R. Sause [9], J. Moon [10], Н. Pasternak [11] та багатьох інших.

Не розв'язаною раніше частиною проблеми є те, що з поширенням застосування БТГС в нашій країні зросла потреба в розвитку та урізноманітненні конструктивних форм такого типу балок із подальшою розробкою для них практичних методів розрахунку.

Задачі дослідження. З метою пошуку шляхів підвищення ефективності балок із гофрованою стінкою першочерговими завданнями, які постають в даній роботі, є представлення нових легких балочних конструкцій та розроблення інженерних рекомендацій щодо розрахунку такого типу балок.

Виклад основного матеріалу. З метою розвитку конструктивних рішень БТГС представлено балки з поперечно профільованою стінкою трапецеїдального (синусоїдального) обрису з поясами із швелерів на самонарізних гвинтах (рис. 1, а, б). До складу таких конструкцій входить одинарна профільована стінка (1), трапецієвидної (синусоїдальної) форми, яка закріплюється саморізами (4) до поясів (2) (гнуті або прокатні швелери). За допомогою зварювання (3) опорні ребра (5) (зварні таври) примикають до поясів, а стінка за допомогою ламелі прикріплюється саморізами (4).

Розглянемо основні рекомендації розрахунку БТГС на прикладі сталеві балки з подвійною профільованою стінкою (рис. 2) прогоном L , із висотою та товщиною подвійної стінки відповідно h_w та $2t_w$, шириною b_f та товщиною полиці t_f . Ширина та товщина фланців (опорні ребра) становлять відповідно b_ϕ та t_ϕ .

Аналіз існуючих методик розрахунку балок із гофрованою стінкою [1, 5] показав, що в балках з умовною гнучкістю стінки $\bar{\lambda}_w \geq 7$ згинальний момент сприймається тільки поясами, тобто для елементів із поперечно-гофрованою стінкою, згинальних в одній з головних площин, перевірку максимальних напружень в поясах виконують за формулою:

$$\sigma_f = \frac{M}{A_f \cdot h} \leq R_y \gamma_c, \quad (1)$$

де σ_f – нормальні напруження в поясах балки з поперечно-гофрованою стінкою; A_f – площа поясу балки; $h = h_w + t_f$ – відстань між центрами ваги поясів, де t_f – товщина поясу балки; R_y – розрахунковий опір сталі розтягу, стиску, згину за межею текучості; γ_c – коефіцієнт умов роботи; M – згинальний момент у головній площині.

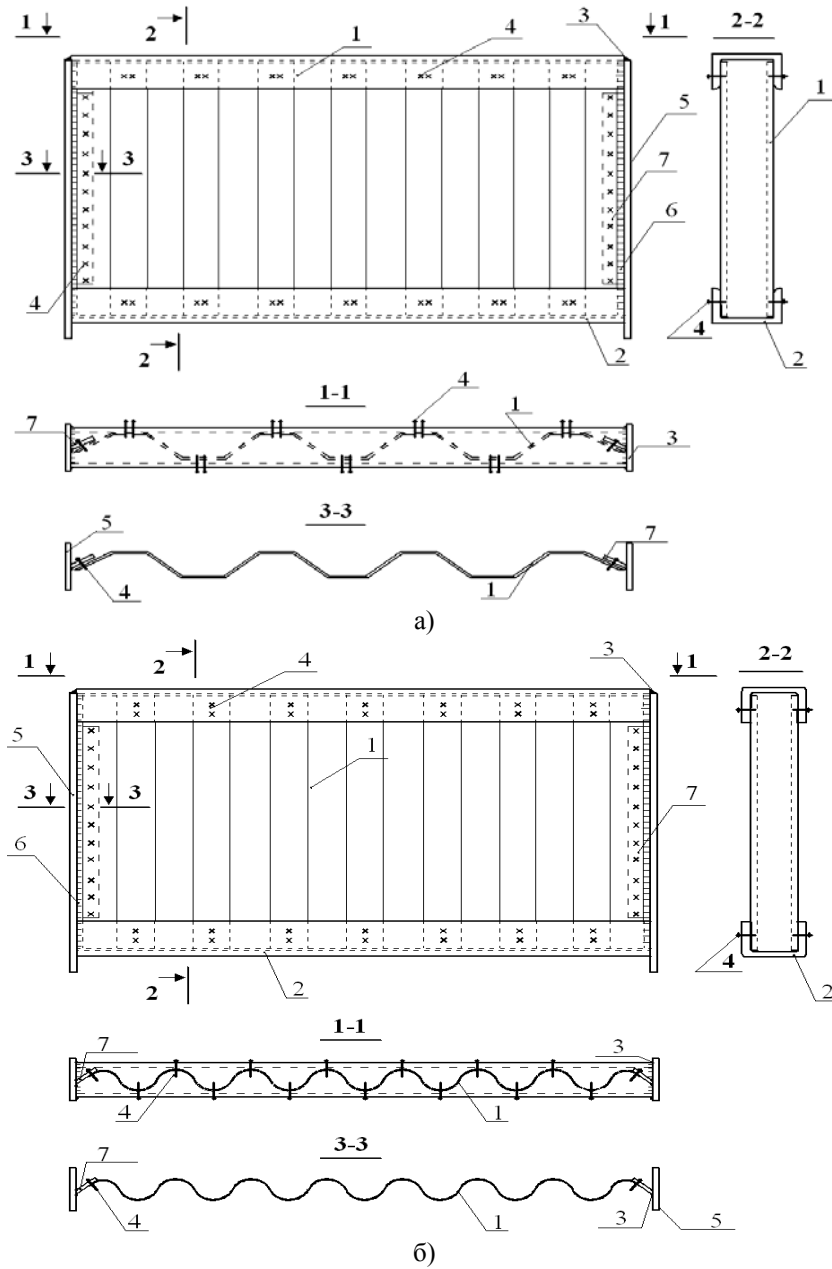


Рис. 1. Балка з поперечно профільованою стінкою з поясами із швелерів на самонарізних гвинтах:
а – стінка трапецеїдального обрису; б – стінка синусоїдального обрису

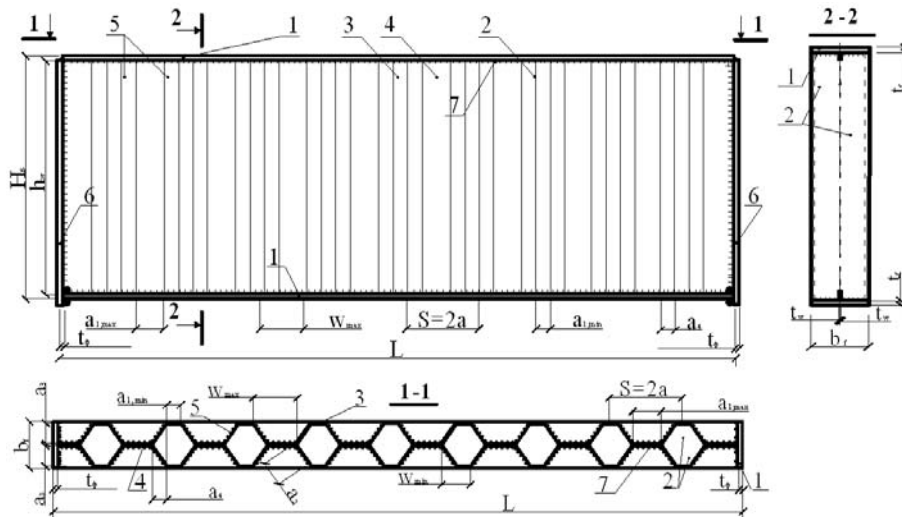


Рис. 2. Балка з подвійною профільованою стінкою трапецеїдального обрису:
1 – полиці двотавра; 2 – профільована стінка; 3 – коротша горизонтальна ділянка гофри; 4 – довша горизонтальна ділянка гофри; 5 – похила горизонтальна ділянка гофри; 6 – опорні ребра; 7 – безперервне зварювання

Якщо розглядати реальну роботу стінки, то відмітимо, що приварювання гофрованої стінки до полиці ускладнює виникнення поперечних деформацій, тому саме в цих місцях стінка працює аналогічно до плоскої. Але рухаючись в напрямі до середньої осі балки, вплив нормальних напружень зникає на відстані ch_w [5, 6], яка залежить від кроку та висоти гофрів, а також загальної висоти стінки.

На основі проведених досліджень [13] існує можливість представлення гофрованої стінки у вигляді плоскої ортотропної пластинки такої ж товщини з приведеними пружними характеристиками та запропонованої формули визначення значень нормальних напружень в будь-якій точці симетричного поперечного перерізу гофробалки:

$$\sigma_x = E(z) \cdot z \cdot \frac{M}{D_0}, \quad (2)$$

де σ_x – нормальні напруження в балці, визначені з урахуванням нелінійної роботи гофрованої стінки; E – модуль пружності сталі; M – згинальний момент у головній площині; D_0 – жорсткість при згині відносно осі Y; z – координата по висоті перерізу.

Приймаючи дотичні напруження рівномірно розподіленими по висоті стінки, розрахунок рекомендуємо проводити таким чином:

$$\tau_{xy,max} = \frac{Q_{max}}{h_w t_w k_\lambda} \leq R_s \gamma_c, \quad (3)$$

де $\tau_{xy,max}$ – максимальне дотичне напруження в стінці балки від розрахункового навантаження; Q_{max} – максимальна поперечна сила в балці; h_w – повна висота гофрованої стінки; t_w – товщина гофрованої стінки; R_s – розрахунковий опір сталі зсуву.

Пропонується коефіцієнт, який враховує геометрично нелінійну поведінку тонкої гофрованої стінки і визначається таким чином:

$$k_\lambda = 1 - 0,008 \bar{\lambda}_w, \quad (4)$$

де $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – умовна гнучкість гофрованої стінки.

Згідно з [12], на основі експериментальних та теоретичних досліджень доведено виникнення нормальних напружень в стінці балки. Отже, існує можливість врахування впливу стінки в розрахунках стійкості за формулою (3) у випадку відсутності локальних напружень ($\sigma_{loc} = 0$):

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{x,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{0,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c. \quad (5)$$

де $\tau_{xy,max}$ – максимальні дотичні напруження в стінці балки від розрахункового навантаження (3) з урахуванням коефіцієнта k_λ (4); $\tau_{0,cr}$ – критичні дотичні напруження загальної втрати стійкості гофрованої стінки [1].

Рекомендована нова форма визначення критичного нормального напруження $\sigma_{x,cr}$ з урахуванням товщини листа та максимальної ширини ділянки пластинки і характеристик сталі, що отримана для прямокутних пластинок з ребрами за наступною формулою:

$$\sigma_{x,cr} = 3,38 \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t_w}{a_{1,max}}, \quad (6)$$

де $a_{1,\max}$ – найбільша ширина горизонтальної ділянки поперечного перерізу профільованої стінки; $\tau_{0,cr}$ – критичні дотичні напруження загальної втрати стійкості гофрованої стінки [1].

За формулою (6) пропонується виконувати перевірку стійкості за наявності локальних напружень ($\sigma_{loc} \neq 0$):

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{x,cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,\max}}{\tau_{0,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c, \quad (7)$$

де $\sigma_{loc} = \frac{F}{b_{ef} \cdot t_w}$ – локальне напруження в гофрованій стінці під дією зосередженого навантаження, коли зосереджена сила прикладена до верхнього поясу балки $l_{ef} = b + 2t_f$, де b – ширина зони прикладання навантаження; $\sigma_{loc,cr}$ – критичні локальні напруження [1].

Висновки

З метою підвищення раціонального використання сталі представлені балки полегшеного типу з поперечно профільованою стінкою трапецеїдального (синусоїдального) обрису з поясами із швелерів на самонарізних гвинтах. Запропонований спрощений алгоритм розрахунку такого типу конструкцій, співставлений з існуючими методиками. Вказаний алгоритм пропонується для подальшого впровадження в національні норми проектування.

Література

- [1] Лазнюк М. В. Балки з тонкою поперечно гофрованою стінкою при дії статичного навантаження : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / М. В. Лазнюк. – Київ, 2006. – 18 с.
- [2] Рыбкин И. С. Совершенствование конструктивных решений методов моделирования и расчетов гофрированных элементов : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / И. С. Рыбкин. – Москва, 2008. – 22 с.
- [3] Кретинин А. Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / А. Н. Кретинин. – Новосибирск, 2008. – 25 с.

- [4] Егоров П. И. Исследования напряженно-деформированного состояния стальных балок и колонн из двутавра с тонкой гофрированной стенкой : автореф. дис. на соискание уч. степ. докт. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»/ П. И. Егоров. – Хабаровск, 2010. – 24 с.
- [5] Кудрявцев С. В. Несущая способность балок с гофрированной стенкой, ослабленной круговым отверстием : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / С. В. Кудрявцев. – Екатеринбург, 2011. – 175 с.
- [6] Кудрявцев С. В. Расчет двутавровой балки с гофрированной стенкой на изгиб в своей плоскости под действием статических нагрузок / С. В. Кудрявцев. – Екатеринбург, 2007. – 17 с. – (Методика расчета; ч. 1).
- [7] Полторацнев А. С. Несущая способность и оптимизация стальных тонкостенных балок : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / А. С. Полторацнев. – Москва, 2012. – 24 с.
- [8] Sayed-Ahmed, E.Y. Lateral torsion-flexure buckling of corrugated web steel girders / E.Y. Sayed-Ahmed // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures & Buildings. – 2005. – Vol. 158. – P. 53–69.
- [9] Sause, R. Fatigue Life of Girders with Trapezoidal Corrugated Webs / R. Sause [et-al.] // Journal of Structural Engineering. – 2006. – Vol. 132. – № 7/ – P. 1070–1078.
- [10] Moon, J. Lateral-torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending / J. Moon [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2009. – Vol. 47. – P. 21–30.
- [11] Pasternak H. Plate girders with corrugated webs / Hartmut Pasternak, Gabriel Kubieniec // Journal of civil engineering and management. – 2010. – No. 16 (2). – P. 166–171.
- [12] Чичуліна К. В. Надійність вузлів сталевих балок з профільованою стінкою : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Чичуліна К. В. – Полтава, 2011. – 26 с.
- [13] Лукин А. О. Определение нормальных напряжений в поперечных сечениях балок с гофрированной стенкой // Научный электронный архив. – Электронные данные. – URL: <http://econfr.rae.ru/article/7696> (19.09.2013). – Название с экрана.
- [14] Остриков Г. М. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой / Г. М. Остриков, Ю. С. Максимов, В. В. Долинский // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. – № 1. – С. 66–70.

Надійшла до редколегії 26.09.2013 р.