

Розвиток конструктивних рішень сталевих балок з гофрованою стінкою

С.Ф. Пічугін, д.т.н., проф., **В.П. Чичулін**, к.т.н., доц., **К.В. Чичуліна**, к.т.н.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Україна

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

Ключові слова: сталева балка, гофрована стінка, обрис

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

Ключевые слова: стальная балка, гофрированная стенка, очертание

Abstract. With the purpose of development of structural decisions of beams with the corrugated web are presented the series of the effective beam thin-walled constructions. In the article are resulted results of the conducted analysis of structural features and work researches of a new type of steel beams with the corrugated web.

Keywords: steel beam, corrugated web, outline

Стан питання. В умовах сьогодення все більше набувають популяризації легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК), які на Заході впроваджують як «Light Gauge Steel Framing». За рахунок своїх переваг (невеликої питомої ваги, швидкості та технологічності будівництва, економічності) такі конструкції активно впроваджують 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 з 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 на території України з'явилась можливість виготовлення такого типу конструкцій, які володіють 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 призведе 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 суттєвий їх конкурент - це нова лінія гофро-балок Італія-Китай, яка виробляє 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 розробка інженерної методики для впровадження в новий ДБН.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Велика кількість вітчизняних науковців в свій час займалися дослідженням балок з 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 з різними формами та параметрами гофрів з подальшими експериментальними дослідженнями. Дослідженню балок з хвилястими стінками присвячена робота І.С. Рибкіна [2], де він пропонує в таких конструкціях улаштувати жорсткіші гофри на опорних ділянках і зменшувати гофрування до середини прольоту. 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] розглянуті 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 прольоту, та 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], Р. 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 зростає потреба в розвитку та урізноманітненні конструктивних форм такого типу балок з подальшою розробкою для них практичних методів розрахунку.

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

Виклад основного матеріалу. З метою розвитку конструктивних рішень БТГС представлено балки з поперечно профільованою стінкою трапецієдального (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) прольотом 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 з 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 з 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 в головній площині.

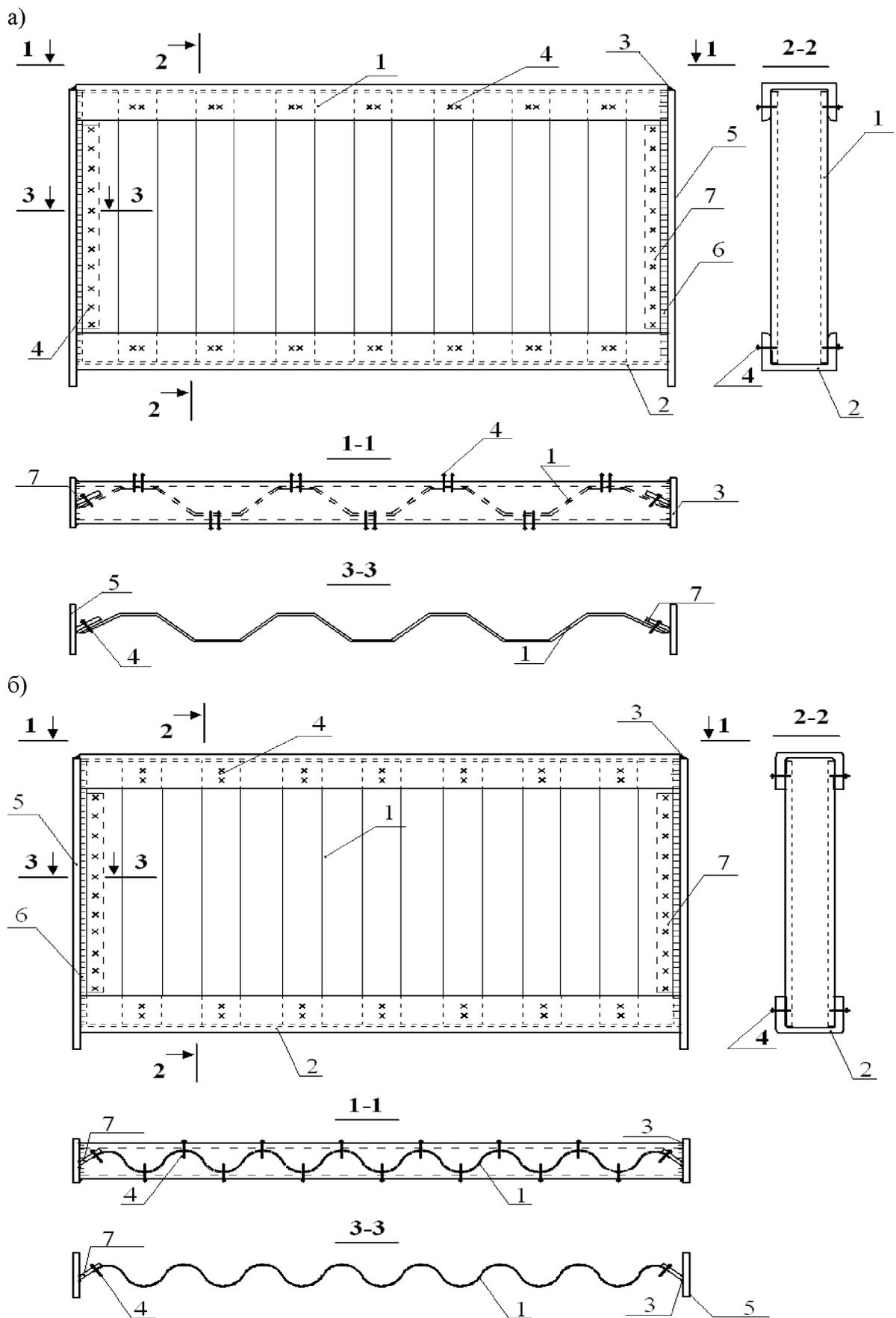


Рис. 1. Балка з поперечно профільованою стінкою з поясами із швелерів на самонарізних гвинтах:
 а – стінка трапецеїдального обрису; б – стінка синусоїдального обрису

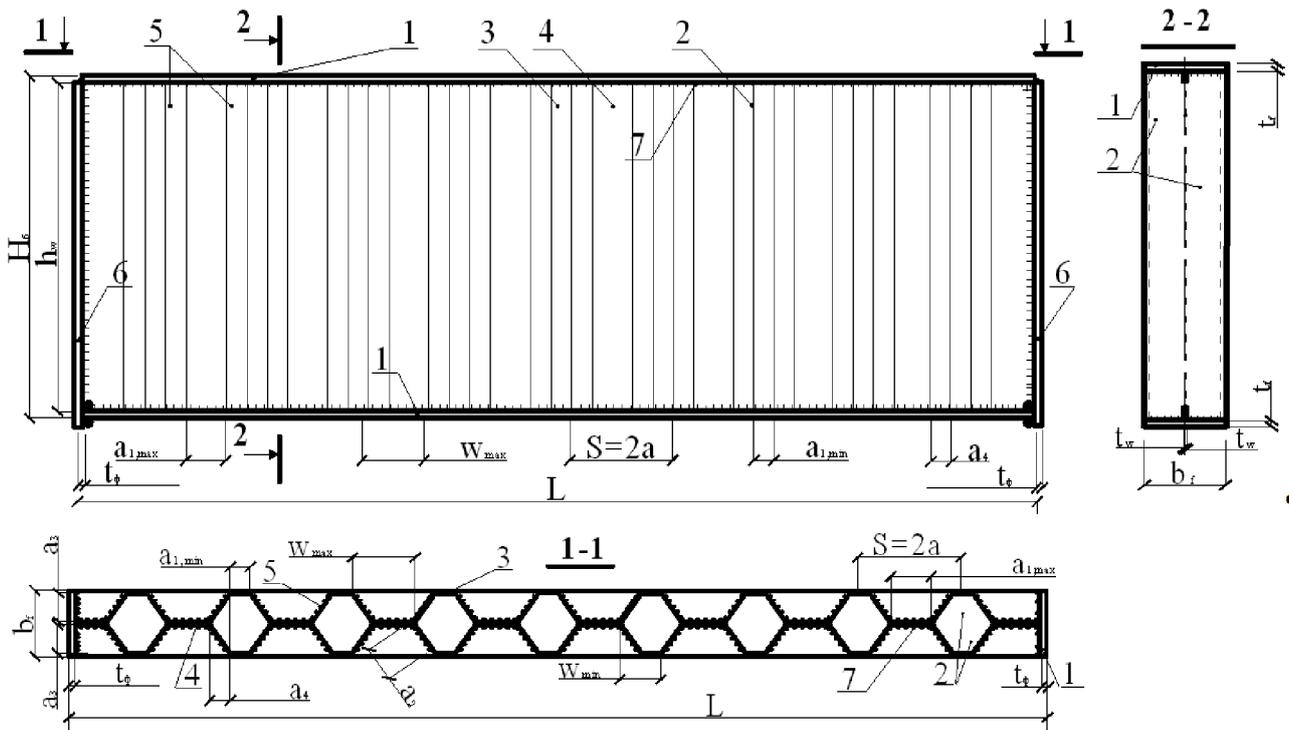


Рис. 2. Балка з подвійною профільованою стінкою трапецеїдального обрису
 Позначення: 1 – полиці двотавра; 2 – профільована стінка; 3 – коротша горизонтальна ділянка гофри; 4 – довша горизонтальна ділянка гофри; 5 – похила горизонтальна ділянка гофри; 6 – опорні ребра; 7 – безперервне зварювання

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 вісі 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 запропонована формула 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 в 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 здвигу.

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

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

де $\overline{\lambda}_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – 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 коефіцієнту 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] (табл. 1).

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

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

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, в порівнянні з існуючими методиками (табл. 1) 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 / 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. Полтораднев 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. Полтораднев. – Москва, 2012. – 24 с.
8. Sayed-Ahmed, E.Y. Lateral torsion-flexure buckling of corrugated web steel girders Текст. / E.Y. Sayed-Ahmed // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures & Buildings. 2005. - Vol. 158. - pp. 53-69.
9. Sause, R. Fatigue Life of Girders with Trapezoidal Corrugated Webs Текст. / R. Sause [et-al.] // Journal of Structural Engineering. 2006. - Vol. 132. — №7-pp. 1070-1078.
10. Moon, J. Lateral-torsional buckling of I-girder with corrugated webs under uniform bending Текст. / J. Moon [et al.] // Thin-Walled Structures. 2009. -Vol. 47.-pp. 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 / Чичуліна К.В. – Полтава, 2011. – 26 с.
13. Лукин А.О. Определение нормальных напряжений в поперечных сечениях балок с гофрированной стенкой // Научный электронный архив. URL: <http://econf.rae.ru/article/7696> (дата обращения: 19.09.2013).
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.

В ході проведених досліджень проведене порівняння запропонованої інженерної методики розрахунку балок, що мають профільовану стінку з існуючими методиками. Результати такого роду дослідження приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння інженерних методик розрахунку балки з гофрованою стінкою

№	За Г.М. Остріковим [13], С.В. Кудрявцевим [6]	За М.В. Лазнюком [1]	Розроблена інженерна методика[12]
1	2	3	4
Розрахунок балок на міцність			
1	<p>Максимальні нормальні напруження балки з урахуванням включення гофрованої стінки в сприйняття моменту:</p> $\sigma_x = \frac{M_x}{W_c} \leq R_y \gamma_c,$ <p>де $W_c = A_f h + \beta \cdot \frac{t_w h_w^2}{6}$ – момент опору балки з гофрованою стінкою; M_x – згинальний момент відносно вісі x.</p> <p>Коефіцієнт, що враховує долю згинального моменту сприйняття стінкою: $\beta = \nu + 2c(1 - \nu) \cdot (1 - c + 0,4c^2)$, де c та ν – коефіцієнти врахування геометричних параметрів гофрованої стінки:</p> $c = \frac{a}{h_w} \cdot \sqrt{f} \quad \text{та} \quad \nu = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{a}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{a}\right)^2 + (1 - \mu^2) \cdot \left(\frac{f}{t_w}\right)^2}.$	<p>Максимальні нормальні напруження в поясах балки (при $\bar{\lambda}_w \geq 7$):</p> $\sigma_f = \frac{M}{A_f \cdot h} \leq R_y \gamma_c.$	Пропозиції автора
			<p>Нормальні напруження в балці з урахуванням нелінійної роботи гофрованої стінки згідно [13]:</p> $\sigma_x = E(z) \cdot z \cdot \frac{M}{D_0}.$
Перевірка міцності стінки за дотичними напруженнями			
	$\tau_{xy,max} = \frac{Q_{max}}{h_w t_w \gamma_{wc}} \leq R_s \gamma_c,$	$\tau_{xy,max} = \frac{Q_{max}}{h_w t_w k_\lambda} \leq R_s \gamma_c,$	
2	де γ_{wc} – коефіцієнт умов роботи поперечно-гофрованої стінки на зріз.	де k_λ – коефіцієнт, який враховує геометрично нелінійну поведінку тонкої гофрованої стінки.	
	$\gamma_{wc} = 0,9.$	$k_\lambda = 1,085 - 0,008 \bar{\lambda}_w.$	Пропозиції автора
			$k_\lambda = 1 - 0,008 \bar{\lambda}_w.$

1	2	3	4		
Перевірка приведених напружень в стінці					
3	Для стінок балок повинна виконуватись умова: $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy,max}^2} \leq 1,15R_y \gamma_c.$	При умові прикладання зосереджених сил для гофрованих стінок міцність: $\sigma = \sqrt{\sigma_{loc}^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1,15R_y \gamma_c.$	В місцях найбільш несприятливого поєднання поперечних сил та згинальних моментів в балці: $\sigma_{прив} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1,15R_y \cdot \gamma_c.$		
			При появі локальних напружень в балці: $\sigma_{прив} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{loc}^2 - \sigma_x \sigma_{loc} + 3\tau_{xy}^2} \leq 1,15R_y \cdot \gamma_c.$		
	Розрахунок на місцеву стійкість поперечно-гофрованої стінки симетричного перерізу				
При наявності локальних напружень ($\sigma_{loc} \neq 0$) слід виконувати за наступною формулою: $\sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{p,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c.$					
Критичні локальні напруження $\sigma_{loc,cr}$ знаходяться наступним чином: $\sigma_{loc,cr} = \frac{0,8 \cdot C_1 \cdot R_y}{\lambda_c^2},$					
де C_1 – коефіцієнт, що залежить від співвідношень s/h_w (синусоподібні гофри)					
або d/h_w (трикутні та трапецеїдальні гофри) та $\delta = 0,8 \cdot \frac{b_f}{h_w} \cdot \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^3.$					
Визначення коефіцієнту C_1 в залежності від δ					
	Значення C_1 для балок з гофрованими стінками при s/h_w (d/h_w)				
δ	0,1	0,2	0,3	0,4	$\geq 0,5$
1	7,73	8,50	9,34	10,30	11,30
2	7,67	8,50	9,50	10,60	11,80
4	7,57	8,50	9,53	10,70	12,00
≥ 6	7,69	8,67	9,77	11,02	12,40
При відсутності локальних напружень ($\sigma_{loc} = 0$):				$\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{p,cr}} \leq \gamma_c$	

1	2	3	4														
3	<p>Критичні дотичні напруження місцевої втрати стійкості панелі гофри:</p> $\tau_{p,cr} = \frac{1,12 \cdot C_{p,cr} \cdot R_s}{\bar{\lambda}_c^2},$ <p>де $C_{p,cr}$ – коефіцієнт, який залежить від відношення висоти стінки та ширини гофри (h_w / b_w); $\bar{\lambda}_c = \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – умовна гнучкість панелі гофри; b_w – ширина панелі гофри.</p> <table border="1" data-bbox="271 719 913 786"> <tr> <td>h_w/b_w</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>$C_{p,cr}$</td> <td>9,34</td> <td>6,47</td> <td>6,04</td> <td>5,875</td> <td>5,71</td> <td>5,34</td> </tr> </table>	h_w/b_w	1	2	3	4	5	∞	$C_{p,cr}$	9,34	6,47	6,04	5,875	5,71	5,34	<p>Критичні дотичні напруження місцевої втрати стійкості панелі гофри:</p> <p>- для синусоїдальної стінки:</p> $\tau_{p,cr} = 1,12 \left(5,34 + \frac{f \cdot s}{h_w \cdot t_w} \right) \frac{R_s}{\bar{\lambda}_c^2};$ <p>де f – висота гофрів; s – довжина півхвилі синусоїдальної гофрованої стінки; $\bar{\lambda}_c$ – умовна гнучкість панелі гофри</p> $\bar{\lambda}_c = \frac{s}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \text{ або } \bar{\lambda}_c = \frac{d_{max}}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}};$ <p>- для трикутної та трапецеїдальної стінки:</p> $\tau_{p,cr} = \frac{6R_s}{\bar{\lambda}_c^2}.$	
	h_w/b_w	1	2	3	4	5	∞										
	$C_{p,cr}$	9,34	6,47	6,04	5,875	5,71	5,34										
Розрахунок на загальну стійкість поперечно-гофрованої стінки балки																	
<i>При наявності локальних напружень ($\sigma_{loc} \neq 0$) слід виконувати за наступною формулою:</i>																	
$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{y,cr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{0,cr}} \right)^2} \leq \gamma_c.$	Пропозиції автора																
<p>Критичні нормальні напруження загальної втрати стійкості гофрованої стінки полягає в наступному:</p> $\sigma_{y,cr} = \varphi \cdot R_y \leq \sigma_{loc,cr},$ <p>де φ – нормативний коефіцієнт поздовжнього згину для центрально – стиснутих елементів при гнучкості умовної стійки $\lambda = \frac{2,5h_w}{f}$.</p>	$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{x,cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{0,cr}} \right)^2} \leq \gamma_c,$ <p>де $\sigma_{loc} = \frac{F}{b_{ef} \cdot t_w}$ – локальне напруження в гофрованій стінці під дією зосередженого навантаження.</p>																

1	2	3	4	
4	<i>При відсутності локальних напружень ($\sigma_{loc} = 0$) слід виконувати за наступною формулою:</i>			
	$\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{0,cr}} \leq \gamma_c.$	Пропозиції автора		
	<p>Критичні дотичні напруження загальної втрати стійкості гофрованої стінки $\tau_{0,cr}$:</p> $\tau_{0,cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2 \cdot \frac{C_{0,cr}}{1,4} = \frac{1,12 \cdot C_{0,cr} \cdot R_s}{\bar{\lambda}_w^2},$ <p>де $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – умовна гнучкість гофростінки.</p> <p>Коефіцієнт, який знаходиться в залежності від відношення параметрів гофрів (b_w та f):</p> $C_{0,cr} = 5,34 + (5,5\beta^2 - 0,6) \cdot \sqrt[3]{\frac{\gamma}{47(\beta^2 - 5)}},$ <p>де $\beta = h_w / a$ – відношення висоти гофрованої стінки до кроку гофрів.</p>			<p>Розрахунок на загальну стійкість з урахуванням дії нормальних напружень при відсутності локального напруження ($\sigma_{loc} = 0$):</p> $\sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{x,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{0,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c.$ <p>Критичне напруження відносно головної вісі:</p> $\sigma_{cr} = 3,38 \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t_w}{a_{1,max}}\right)^2.$
	<p>$\gamma = 0,91 \cdot \left(\frac{f}{t_w}\right)^2$ – відношення погонної жорсткості гофрованої стінки до циліндричної жорсткості плоскої стінки</p>	<p>Визначимо відношення погонної жорсткості гофрованої стінки до циліндричної жорсткості плоскої пластинки такої ж товщини (γ):</p> $\gamma = \frac{EI}{Da} = \frac{12(1-\nu^2) I}{t_w^3 a} = \frac{12(1-\nu^2) \bar{I}}{t_w^3},$ <p>де \bar{I} – погоний момент інерції гофра; I_x – момент інерції стінки.</p>		
<p>При умові $\gamma \geq 4(7\beta^2 - 5)$ значення $C_{0,cr}$ не залежить від γ, отже перевірка стійкості буде $\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{p,cr}} \leq \gamma_c$.</p>	<p>При умові $\gamma \geq 4(7\beta^2 - 5)$, стійкість стінки визначають за місцевою стійкістю панелі гофри і перевірка стійкості гофростінки при $\beta = h_w / a \leq 8,4$ буде $\tau_{p,cr} = 1,12 \left(5,34 + \frac{f \cdot s}{h_w \cdot t_w}\right) \frac{R_s}{\lambda_c^2}$ або $\tau_{p,cr} = \frac{6R_s}{\lambda_c^2}$.</p>			

1	2	3	4
4		<p>При $\beta = h_w/a > 8,4$ розрахунок загальної стійкості виконують так:</p> $\tau_{o,cr} = 32,4 \frac{\sqrt[4]{D_1 \cdot D_2^3}}{h_w^2 \cdot t_w},$ <p>де D_1 і D_2 – характеристики жорсткості згину гофрованого листа за головними напрямками, які обчислюються таким чином: $D_1 = \frac{E \cdot t_w^3 \cdot a}{12 \cdot s}$; $D_2 = \frac{E \cdot J}{a}$ при $D_1 \ll D_2$ (реальні конструкції).</p>	
		<p>При перевірці загальної стійкості стінки у випадку виконання умови $\sigma_{y,cr} \leq \sigma_{loc,cr}$ необхідно приймати $\sigma_{loc,cr}$ замість $\sigma_{y,cr}$. При перевірці стійкості повинні виконуватись наступні умови: 1) $\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}} \leq 0,75\gamma_c$; 2) $e \leq f$.</p>	
Перевірка балки на жорсткість			
	Перевірка за жорсткістю балки виконується наступним чином:	$\frac{f}{l} \leq \left[\frac{f}{l} \right].$	
	Прогини балки у випадку прикладання зосередженого навантаження :	$f = \frac{F \cdot l^3}{28,17 \cdot EI_c},$ <p>де $I_c = \frac{A_f \cdot h^2}{2} + \beta \frac{t_w h_w^3}{12}$ – момент інерції; β – коефіцієнт, який показує відношення моментів інерції гофрованої та плоскої стінки</p>	
5	У випадку рівномірно розподіленого навантаження визначення прогину набуває вигляду:	$f = \frac{5M_n \cdot l^2}{48 \cdot EI_f} + \frac{Q_n \cdot l}{G \cdot A_w} < f_u,$ <p>де M_n, Q_n – момент у середині балки і поперечна сила на опорі від нормативного навантаження; I_f – момент інерції балки без урахування площі стінки. Враховують вплив нормальних та дотичних напружень при визначенні прогинів балки:</p> $f = \int \frac{M_1 \cdot M_n \cdot d_s}{EI_f} + \int \frac{Q_1 \cdot Q_n \cdot d_s}{G \cdot A_w} < f_u,$ <p>де M_1, Q_1 – згинальні моменти і поперечні сили від сили $F = l$ в точці визначення прогину.</p>	