

УДК 624.071.34

*С.Ф. Пічугін, д.т.н., професор
В.П. Чичулін, к.т.н., доцент
К.В. Чичуліна, к.т.н., ст. викл.*

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

АНАЛІЗ РОБОТИ ПРОФІЛЬОВАНОЇ СТІНКИ СКЛАДЕНОЇ БАЛКИ

Запропоновано практичні рекомендації та сформульовано новий підхід до розрахунку конструкцій сталевих складених балок із профільованою стінкою. Детально проаналізовано роботу профільованої стінки трапецеїдального обрису та порівняння пропозицій розрахунку з проектом національних норм.

***Ключові слова:** сталева складена балка, профільована стінка, коробчастий переріз, методика розрахунку.*

УДК 624.071.34

*С.Ф. Пичугин, д.т.н., профессор
В.П. Чичулин, к.т.н., доцент
К.В. Чичулина, к.т.н., ст. препод.*

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРОФИЛИРОВАННОЙ СТЕНКИ СОСТАВНОЙ БАЛКИ

Предложены практические рекомендации и сформулирован новый подход к расчету конструкций стальных составных балок с профилированной стенкой. Детально проанализирована работа профилированной стенки трапецеидального очертания и сравнены предложения расчета с проектом национальных норм.

***Ключевые слова:** стальная балка, профилированная стенка, коробчатое сечение, методика расчета.*

UDC 624.071.34

*S.F. Pichugin, Sc.D.
V.P. Chichulin, Ph.D.
K.V. Chichulina, Ph.D.*

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

ANALYSIS OF PROFILED WEBS' WORK OF THE COMPOUND BEAM

In the articles there have been offered practical recommendations and has been formulated a new approach to proportioning of compound beams' structures with profiled webs. There has also been made a detailed analysis of trapezoid profiled webs' work. The author of the article has made a comparison of suggestions of calculation with the project of national norms.

***Keywords:** steel beam, profiled web, box-shaped section, method of calculation.*

Вступ. У наш час одним із головних завдань, котрі постають перед проектувальниками, є розроблення нових будівельних конструкцій, котрі б дозволили суттєво знизити матеріаломісткість та собівартість, зменшити витрати на монтаж і виготовлення, відповідаючи при цьому вимогам стійкості, міцності та довговічності. У нашій країні останніми роками активно впроваджуються методи оптимального проектування, а також розробка ефективних конструктивних рішень і систем, одним із прикладів яких є балка з гофрованою стінкою. Така конструкція порівняно навіть з балками, що мають гнучку стінку, більш оптимальна, оскільки забезпечує підвищену крутильну жорсткість, більший запас на місцеву стійкість стінки та потребує меншої кількості ребер жорсткості. А порівнюючи гофробалку зі звичайною зварною, не можна не відмітити суттєвих переваг, які полягають у зниженні трудовитрат за рахунок роботизованого виготовлення та зменшення витрат металу (тонка гофрована стінка). В умовах збільшення обсягів виробництва балок з гофрованою стінкою існує потреба в розробленні інженерної методики для практичного проектування з метою подальшого впровадження в майбутні державні нормативні документи.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Створенню та розвитку комплексних методів розрахунку балок з гофрованою стінкою присвячено роботи М.В. Лазнюка [1], А.Н. Кретиніна [2], С.В. Кудрявцева [3], О.С. Полтораднева [4], А.О. Лукіна [5]. У сучасних зарубіжних нормах наведено алгоритми розрахунку балок з гофрованою стінкою трьох різних конфігурацій (хвиляста, трикутна, трапецеїдална) [6 – 9]. У роботі [10] на основі зарубіжного і вітчизняного досвіду подано методику розрахунку для балок із трапецієподібним обрисом стінки, яку було експериментально підтверджено.

Не розв'язаною раніше частиною проблеми є те, що в існуючих державних нормах відсутня методика розрахунку сталевих балок з гофрованою стінкою. Отже, існує необхідність уведення в нормативні документи рекомендацій щодо розрахунку та проектування такого типу конструкцій.

Мета дослідження полягає у розробленні методики розрахунку складених балок із профільованою стінкою трапецієподібного перерізу із врахуванням сучасних аналітичних підходів та математичних залежностей, а також здійсненні порівняльного аналізу з розрахунком, що запропоновано проектом норм [5].

Основний матеріал і результати. Існує поширена гіпотеза [1 – 3], що полиці сприймають нормальні напруження, а стінка – тільки дотичні (сприйняття стінкою згинального моменту мінімальне). У цілому, таке твердження можна вважати прийнятним, але, розглядаючи дійсну роботу профільованої стінки в місцях з'єднання її з поясами, зауважимо, що експериментальним і теоретичним шляхом доведено сприйняття стінкою згинального моменту та появу нормальних напружень [10], які мають тенденцію до згасання в середній частині балки.

В елементах складеного двотаврового перерізу для підвищення їхньої стійкості та зниження металоємності застосовують поперечно-гофровані стінки відносно поздовжньої осі елемента, які можуть складати із трапецієподібних або хвилястих відсіків (рисунок 1). Гнучкість $\lambda = h_w/t_w$ поперечно-гофрованих стінок приймається в межах 300 ... 500.

Розрахунковими параметрами складеного двотаврового перерізу із хвилястою поперечно-гофрованою стінкою є:

a – довжина хвилі гофра;

h_{ef} – розрахункова висота стінки (рисунок 1), що дорівнює у зварних балках з гофрованою стінкою повній висоті стінки – h_w ;

t_w – товщина гофрованої стінки;

f – висота хвилі гофра;

s – довжина дуги хвилі гофра;

r – умовний радіус хвилі.

Довжина довшої та коротшої ділянок трапецієподібних гофрів профільованої стінки дорівнює $a_{1,max}$ та $a_{1,min}$, відповідно довжина похилої ділянки визначається розміром a_2 , крок профільованого листа становить $s=2a$.

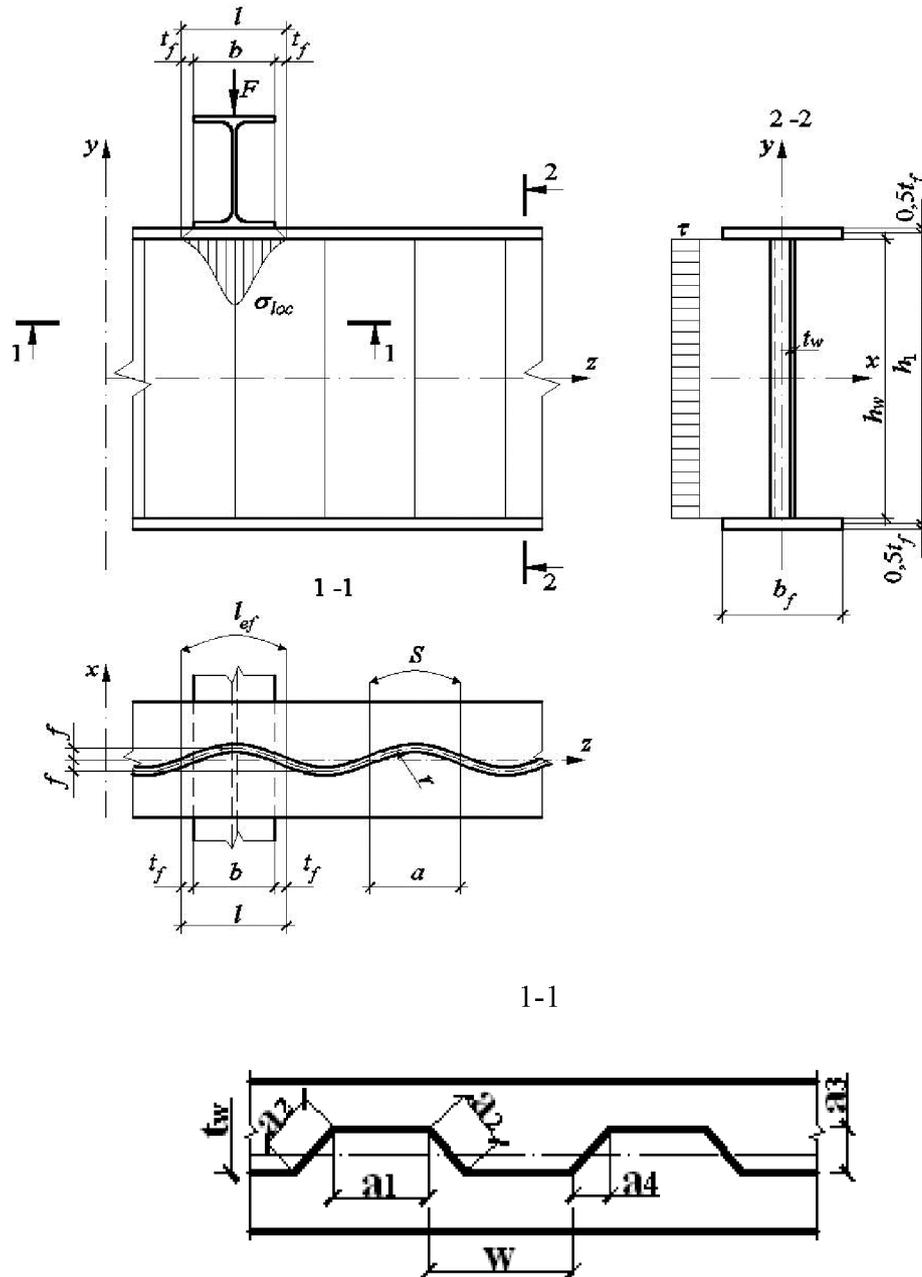


Рис. 1. Схема елемента з хвилястою і трапецієподібною поперечно-гофрованою стінкою

Таблиця 1. Порівняльні характеристики розрахунку балок з профільованою стінкою

Розрахунок згинальних елементів із профільованою стінкою	
Розрахунок за проектом ДБН балок із синусоїдальною стінкою	Розрахунок балок з трапецієподібною стінкою
Згинальні елементи у площині дії моменту	
$\frac{M \gamma_n}{A_f h_1 R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$	
де $h_1 = h_w + t_f$ – відстань між центрами ваги поясів.	
Міцність стінки на зріз слід перевіряти так:	
$\frac{Q \gamma_n \alpha}{h_w t_w R_s \gamma_c \gamma_{wc}} \leq 1, \quad (2)$	
де $\gamma_{wc} = 0,9$ – коефіцієнт умов роботи поперечно-гофрованої стінки на зріз; $\alpha = \frac{a_1}{(a_1 - d)}$ – коефіцієнт послаблення стінки, a_1 – крок отворів; d – діаметр отворів. За відсутності отворів $\alpha = 1$.	
Перевірку на місцеву стійкість панелі гофра при ($\sigma_{loc} \neq 0$) слід виконувати так:	
$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{p,cr}}\right)^2} \leq 1, \quad (3)$	
де $\tau_{xy,max} = \frac{Q_{max} \gamma_n}{h_w t_w \gamma_{wc}}$ – максимальне дотичне напруження в поперечно-гофрованій стінці від розрахункового навантаження.	
<p>Критичні дотичні напруження місцевої втрати стійкості</p> $\tau_{p,cr} = 12,9 h_w R_s / (k a \bar{\lambda}_w^2),$ <p>де k – відношення довжини дуги хвилі гофра s до довжини хвилі a;</p> $\bar{\lambda}_w = \frac{r}{t_w \pi} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – умовна гнучкість панелі гофра; $r = 0,125 a^2 / f + 0,5 f$ – умовний радіус хвилі. <p>При $r / t_w \leq 1,57 \sqrt{E / R_y}$ місцева стійкість вважається забезпеченою.</p>	$\tau_{c,l} = 4,83 \cdot E \cdot \left[\frac{2 t_w}{a_{1,max}} \right]^2$ – дотичні напруження при локальному згині подвійної профільованої стінки.
$\sigma_{loc,cr}$, σ_{loc} – критичні локальні й локальні напруження гофрованої стінки при дії зосередженого навантаження; необхідно визначати, як для складених балок.	

Перевірку на загальну стійкість хвилястої поперечно-гофрованої стінки балки при ($\sigma_{loc} \neq 0$) виконують за формулою

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{y,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy,max}}{\tau_{o,cr}}\right)^2} \leq 1, \quad (4)$$

де $\sigma_{y,cr} = \varphi R_y \leq \sigma_{loc,cr}$ – критичне нормальне напруження загальної втрати стійкості стінки, розрахованої на поздовжній згин із площини, як умовна стійка, навантажена зосередженою силою F ;

де φ – коефіцієнт, що визначається для приведеної гнучкості умовної стійки,

$$\bar{\lambda} = \frac{2,5h_w}{f} \sqrt{\frac{R_y}{E}}.$$

У випадках, коли $\sigma_{y,cr} > \sigma_{loc,cr}$ при перевірці загальної стійкості гофрованої стінки слід приймати $\sigma_{loc,cr}$ замість

$\sigma_{y,cr}$.

$\tau_{o,cr} = k_\tau R_s / \bar{\lambda}_w^2$ – критичне дотичне напруження загальної втрати стійкості гофрованої стінки,

де k_τ – коефіцієнт, що визначається залежно від відносних параметрів f/a та f/t_w .

де $s = a_{1,max} + a_2$ – розмір розгорнутої панелі гофри; $w = (w_{max} + w_{min})/2$ – середня довжина півхвилі;

$$\tau_{o,cr} = 32,4 \frac{\sqrt{D_1 \cdot D_2^3}}{h_w^2 \cdot t_w} = 2,7 \cdot E \cdot \sqrt{\frac{t_w^2 \cdot h_w}{(1-\nu^2) \cdot s \cdot w^2}}$$

– дотичні напруження при загальному згині;

$$D_1 = \frac{E \cdot t_w^3}{12 \cdot (1-\nu^2)} \cdot \frac{w}{s}, \quad D_2 = \frac{E \cdot I}{w}$$

жорсткості згину стінки; I – момент інерції стінки.

$$\sigma_{o,cr} = 3,38 \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t_w}{a_{1,max}}\right)^2$$

– критичні напруження при загальному згині.

У проекті норм [5] наведено розрахунок балок із синусоїдальною стінкою. Розрахунок оснований на загальних положеннях *Eurocode 3* [6], але, на наш погляд, у дуже спрощеному вигляді з прийнятими наближеними деякими коефіцієнтами, наприклад, γ_{wc} , k_τ .

Запропоновано для розрахунку балок із профільованою трапецієподібною стінкою використовувати наведену вище методику, що враховує роботу стінки при локальному та загальному згинах.

Висновок. Виконано порівняльний аналіз розрахунків балок з профільованою стінкою, запропонованих нормами. У результаті здійснених досліджень запропоновано методи проектування балок із профільованою трапецієподібною стінкою, що надасть можливість проектувати цей тип конструкції із забезпеченням достатнього ступеня безвідмовної роботи.

Література

1. Лазнюк, М.В. Балки з тонкою поперечно-гофрованою стінкою при дії статичного навантаження: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.23.01 / М.В. Лазнюк; Київ. нац. ун-т буд-ва та архіт. – К.: КНУБА, 2006. – 18 с.
2. Кретинин, А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: 05.23.01 / А.Н. Кретинин; Новосиб. госуд. архит.-строит. ун-т. – Новосибирск: НГАСУ, 2008. – 25 с.
3. Кудрявцев, С.В. Несущая способность балок с гофрированной стенкой, ослабленной круговым отверстием: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: 05.23.01 / С.В. Кудрявцев; Новосиб. госуд. архит.-строит. ун-т. – Екатеринбург, 2011. – 25 с.
4. Полтораднев А.С. Несущая способность и оптимизация стальных тонкостенных балок : автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / А.С. Полтораднев. – Москва, 2012. – 24 с.
5. ДБН В.2.6-XXX:201X Конструкції будинків і споруд. – Сталеві конструкції. – Норми проектування (Проект, перша редакція) Київ: Мінрегіонбуд України. – 293 с.
6. Eurocode 3 EN 1993-1-5: 2004: Design of steel Structures. Part 1.5 Plated Structural Elements.
7. Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 "Plated structural elements"/ B. Johansson, R. Maquoi, G. Sedlacek, C. Muller, D. Beg. – 2007. – 228 p.
8. DASt Richtlinien 015. Träger mit schlanken Stege. – Stahlbau-Verlag, Köln, 1990.
9. ҚР ҚНЖЕ 5.04-07:2004 / СН РК 5.04-08:2002. Стальные конструкции. – Астана: Комитет по делам строительства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2003. – 118 с.
10. Чичуліна, К.В. Надійність вузлів сталевих балок з профільованою стінкою: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 / К.В. Чичуліна. – Полтава, 2011. – 26 с.