

ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД ПРОЕКТУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ БАЛОК З ГОФРОВАНИМИ СТІНКАМИ

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

Анотація. В статті проаналізовано європейський досвід проектування балок з гофрованою стінкою. Представлені європейські підходи до розрахунку такого типу конструкцій представлені. Розглянута методика пропонується для подальшого застосування в українських нормах.

Ключові слова: сталева балка, гофрована стінка, розрахунок.

Abstract. The article analyses the European experience in the design of beams with corrugated web. European approaches to the calculation of this type of construction presents. The technique is proposed for further application in the Ukrainian standards.

Keywords: steel beam, corrugated web, calculation.

Стан питання. Останнім часом пріоритетним напрямком розвитку енергоефективної політики держави є впровадження сучасних ресурсоекономних конструкцій, які призводять до суттєвого зменшення матеріаломісткості й поліпшення експлуатаційних показників. Поява нових легких металевих конструкцій спонукає проектувальників до пошуку оптимальних рішень та адаптації українських норм до єдиного європейського наукового простору. Низку проблем щодо зменшення маси, підвищення стійкості і жорсткості конструкцій проектувальники й виробники вирішують за

рахунок застосування нових легких металевих балок з гофрованими стінками. Такі конструктивні форми забезпечують економію матеріалу до 50% в порівнянні зі звичайними гарячекатаними балками, а нове автоматизоване устаткування дозволяє суттєво скоротити строки їх виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Попередньо авторами статті були проведені дослідження присвячені пошуку методик розрахунку тонкостінних балок [1 - 2]. Існує велика кількість зарубіжних наукових робіт, в яких розпочато розв'язання питань аналізу існуючих алгоритмів розрахунку балок з гофрованою стінкою. Серед них, безперечно, можна відзначити праці Н.Г. Ноор, В. Johansson, Н.Н. Junior, J. Linder, Н. Pasternak, J. Robra, Е.У. Sayed-Ahmed, W. Siokola, D.G. Souza, X. Wang [1 – 12] та інші.

Не розв'язаною раніше частиною проблеми є те, що в умовах європеїзації загального наукового простору України гостро постає питання імплементації європейських норм та стандартів. Зокрема, актуальним залишається питання пошуку оптимальних методик розрахунку легких балок з гофрованими стінками, які активно впроваджуються та користуються великим попитом на українському ринку металевих конструкцій.

Задачі дослідження. Задачами проведеного дослідження є аналіз європейського досвіду проектування балок з гофрованою стінкою, визначення головних європейських лідерів виробництва такого типу конструкцій, представлення основних діючих європейських методик розрахунку для можливого застосування в Україні.

Виклад основного матеріалу. Балкою з гофрованою стінкою називають конструкцію, яка складається з поясів різного перерізу та тонкої металевої стінки, що в поперечному напрямку вигнута, тобто гофрована [13 – 14].

В США та Японії балки з трапецеїдальними гофрованими стінками широко використовуються в мостобудівництві з 80-х років, але головною галуззю застосування безперечно являється багатопверхове будівництво, де

такі балки використовують для різноманітних покриттів та перекриттів [3]. В Німеччині та Швеції, Франції, Японії, Нідерландах такі балкові конструкції є дуже популярними в будівництві складських та промислових приміщень, спортивних та торговельних комплексів та інших приміщень.

Існує три головних світових виробника гофробалок: голландська компанія GLP Corrugated plate Industry, компанія Ranabalken, яка функціонує на шведському ринку більше 40 років, та австрійська фірма Zeman & Co.

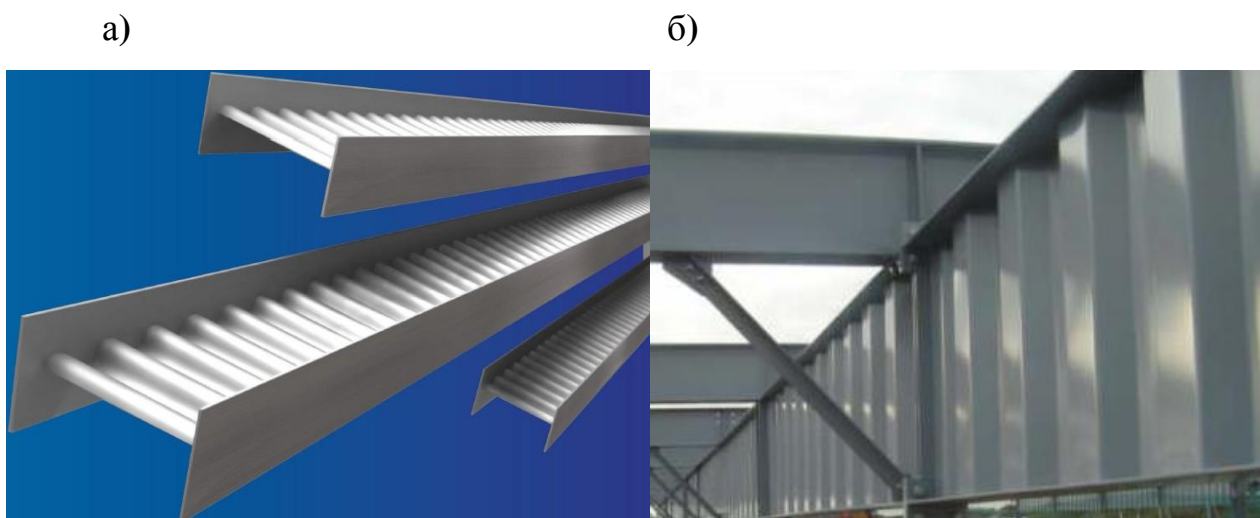


Рис. 1. Конструктивні рішення балок і колон з гофрованими стінками, що мають різні форми гофрів: а – хвилясті; б – трапецеїдальні

Одним з найбільш потужних виробників балок з гофрованою стінкою є австрійська компанія Zeman, яка розробляє гофро-балки (SIN-балки) з гофро-листа та сталевих смуг (рис. 1, а). Також нещодавно з'явилась нова автоматична лінія гофро-балок Італія-Китай (китайської компанії «Jinggong Science & Technology» з італійськими зварними роботами COMAU), яка виробляє аналоги таких конструкцій.

GLP Corrugated plate Industry спеціалізується на балках з гофрованою трапецеїдальною стінкою (рис. 1, б) з максимальною висотою 4 м та товщиною 1,5 мм – 12 мм [3 – 4].

Треба відмітити, що потокові автоматичні лінії з виробництва зварних двотаврових балок з гофрованою стінкою зараз успішно функціонують і популяризуються в Україні. Вітчизняні проектувальники вже давно усвідомили,

що такі конструктивні форми є прогресивним рішенням в проектуванні та реалізації в будівельних об'єктах України та за її межами. Отже, пошук оптимальних методик розрахунку ресурсоекономних конструктивних форм є одним з пріоритетних питань державної політики енергозбереження.

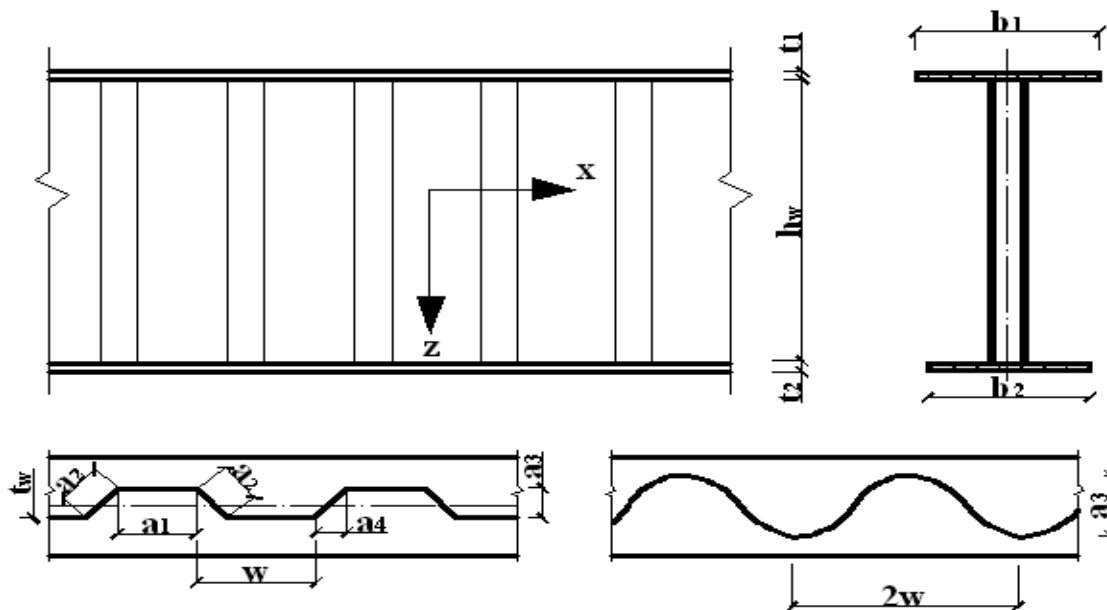


Рис. 2. До розрахунку двотаврів з гофрованою стінкою згідно європейських норм [14]

В європейських нормах [14] та коментарях до них [4] приведена методика розрахунку балок з гофрованою стінкою, що мають трапецеїдальну (рис. 2) та синусоїдальну форму. Треба відмітити, що розглядаються балки з однією віссю симетрії, тобто верхній та нижній пояси різняться. Загалом в європейських методиках, включаючи і норми Німеччини [13], стверджується, що нормальні напруження, які виникають від дії згинального моменту, сприймають лише полиці, а стінка працює тільки на зріз (рис. 3).

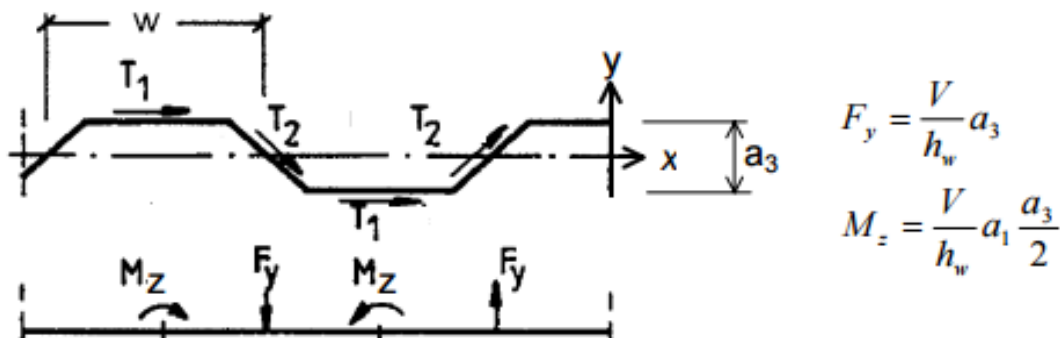


Рис. 3. Модель для розрахунку середніх згинальних моментів [4]

Таким чином, вважається, що гофрована стінка не здатна сприймати поздовжні зусилля, отже, згинальний момент в балці сприймається повністю полицями, а стінка працює на поперечні зусилля [4]. При цьому можливий вплив гофрованої стінки на бічний згинальний опір в порівнянні з плоскою стінкою, тому що гофрування надає стінці суттєву поперечну згинальну жорсткість.

Згідно з [4] стійкість стиснутої полиці може бути розрахована за приведеними нижче формулами. Визначимо максимальний поперечний згинальний момент, який виникає там, де похила частина стінки перехрещує центральну лінію полиці [4]:

$$M_{z,max} = \frac{V \cdot a_3}{4h_w} (2a_1 + a_4), \quad (1)$$

де V – максимальна поперечна сила в балці, кН ;

a_3 – висота профільованого листа стінки, см ;

a_1 – довжина горизонтальних ділянок профільованого листа стінки, см ;

a_4 – геометрична характеристика панелі гофри, см .

Зниження згинального моменту [13, 14] можна виразити наступним фактором:

$$f_T = 1 - 0,4 \sqrt{\frac{6M_{z,max} \cdot \gamma_{M0}}{f_{y,f} \cdot b_f^2 \cdot t_f}}, \quad (2)$$

де $f_{y,f} (R_{y,f})$ – розрахунковий опір сталі полиці, кН/см^2 ;

b_f, t_f – ширина і товщина полиці двотавра, см ;

γ_{M0} – коефіцієнт врахування локальних напружень ($\gamma_{M0} = 1$ [15]).

Даний фактор є невеликим і фактично його не включають ні шведські ні австрійські норми, але з теоретичної точки зору – ці згинальні моменти потрібно враховувати за умов рівноваги. Для синусоїдальної стінки цей фактор дорівнює 1. Згідно з [3] визначають фактор зменшення плоского згину χ для відповідної умовної гнучкості $\bar{\lambda}$, який знаходиться з наступного виразу:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \text{ (за умовою що } \chi \leq 1,0), \quad (3)$$

де $\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$ – коефіцієнт для знаходження фактора зменшення плоского згину;

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot R_{y,r}}{N_{cr}}} \text{ – умовна гнучкість гофри.}$$

Згідно європейських досліджень, а саме Eurocode 3 та методик Н.Растернак (частково ввійшли в німецькі норми [13]), перевірку міцності гофрованої стінки доцільно виконувати за приведеною нижче методикою (табл. 1).

Таблиця 1 – Перевірка міцності гофрованої стінки за дією дотичних напружень

$\tau_{xy,max} = \frac{Q_{max}}{h_w t_w k_\lambda} \leq R_s \gamma_c, \quad (4)$		
<p>де Q_{max} – максимальна поперечна сила; γ_c – коефіцієнт умов роботи; $R_s = 0,58R_y$ – розрахунковий опір сталі зсуву; k_λ – гнучкість гофрованої стінки [13].</p>		
k_λ (EN 1993-1-5) [14]		k_λ (Pasternak Н.) [7]
для локального згину	для загального згину	для загального згину
$k_{\lambda,l} = \frac{1,15}{0,5 + \bar{\lambda}_{c,l}} \leq 1, \quad (5)$	$k_\lambda = \frac{1,5}{0,5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1, \quad (6)$	$k_\lambda = \frac{1}{\bar{\lambda}_{c,g}^{1,5}} \leq 1, \quad (7)$
<p>де $\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{R_s}{\tau_{c,l}}}$ – умовна гнучкість стінки при локальному згині.</p>	<p>де $\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{R_s}{\tau_{c,g}}}$ – умовна гнучкість стінки при загальному згині.</p> <p>Якщо $0,5 \leq \frac{\tau_{c,g}}{\tau_{c,l}} \leq 2$, то $\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{2 \cdot R_s}{\tau_{c,g}}}$,</p> <p>$\tau_{c,g}$ – дотичні напруження при загальному згині стінки; $\tau_{c,l}$ – дотичні напруження при локальному згині стінки.</p>	

Висновок. Запропоновані рекомендації розрахунку балок з гофрованою стінкою на основі провідних європейських досліджень з метою імплементації в українські норми.

1. Аналіз роботи профільованої стінки складеної балки / С.Ф. Пічугін, В.П. Чичулін, К.В. Чичуліна // Зб. Наук. Пр. (галузеве машинобудування, будівництво) / ПолтНТУ – Вип.4 (39). Т 1, 2011. – С. 216 – 221.
2. Розвиток конструктивних рішень сталевих балок з гофрованою стінкою / С.Ф. Пічугін, В.П. Чичулін, К.В. Чичуліна // Збірник наукових праць. УкрНДІпроектстальконструкцій ім. В.М. Шимановського. – К: Сталь, 2013. – Вип. 12. – С. 18–25.
3. Hoop H.G. Literature study. Master thesis: Girders with corrugated webs / H.G. Hoop. – The Netherlands: Papendrecht, 2003. – 48 p.
4. Johansson B., Maquoi R., Sedlacek G., Muller C, Beg D. Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 «Plated structural elements». 2007. – 228p.
5. Junior H. H. Estudo da flambagem lateral com torcao de vigas de aco de alma senoidal / H. Junior. – Belo Horizonte: Universidade federal de minas gerais, Escola de engenharia, Departamento de engenharia de estruturas, 2006. – 131 p.
6. Linder J. Beulwerte für trapezförmig profilierte Bleche unter Schubbeanspruchung / J. Linder, B. Huang // Ernst & Sohn. Stahlbau 64. – 1995. – Heft 12. – P. 370–374.
7. Pasternak H. Plate girders with corrugated webs / Hartmut Pasternak, Gabriel Kubieniec // Journal of civil engineering and management. – 2010. – No. 16(2). – P. 166–171.
8. Robra J. Untersuchung des Tragverhaltens von Rahmenecken. Träger als Wellstegträger . Eckblech als schlankes Wellblech: Diplomthema / J. Robra. – BTU Cottbus, 1997. – 105 p.
9. Sayed-Ahmed E.Y. Design aspects of steel I-girders with corrugated steel webs / E.Y. Sayed-Ahmed // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2007. –No. 7. – P. 27–40.
10. Siokola W. Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profiliertem Steg / W. Siokola // Ernst & Sohn. Stahlbau 66. – 1997. – Heft 9. – P. 595–605.
11. Souza D.G. Estudo da flambagem local da mesa de perfis i com alma sinoidal via análise análise não-linear pero meff / D.G. Souza. – Belo Horizonte: Universidade federal de minas gerais escola de en genharia, 2006. – 142 p.
12. Wang X. Behavior of steel members with trapezoidally corrugated webs and tubular flanges under static loading / X. Wang. – Drexel: Drexel University, 2003. – 192 p.
13. DAST Richtlinien 015, Träger mit schlanken Stege, Stahlbau-Verlag, Köln, 1990.
14. Eurocode 3 EN 1993-1-5: 2004: Design of steel Structures. Part 1.5 Plated Structural Elements.
15. Eurocode 3 EN 1993-1-1: 2004: Design of steel Structures. Part 1.1 General rules and rules for buildings.