

УДК 624.014

**ДО РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНИХ ПЕРЕРІЗІВ ДВОТАВРОВИХ
ЕЛЕМЕНТІВ З ПОПЕРЕЧНО-ГОФРОВАНИМИ СТІНКАМИ**

ас. Нілова Т.О.

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Конструкції з складених двотаврів з тонкими поперечно-гофрованими стінками в останній час знаходять все більше поширення на теренах України і в світі. Певний час практичне використання таких конструкцій стримувалося складністю виготовлення тонких гофрованих стінок на сучасних виробництвах і зварювання їх хвилястими швами з досить товстими поясами.

В останній час в Україні збудовані і випускають балки з синусоїдними стінками два заводи за технологією фірми «Zeman» (Австрія). Одним з основних питань, які певною мірою обмежують застосування таких конструкцій в Україні, є відсутність вітчизняних нормативних документів з їх розрахунку і конструювання.

Існує багато прикладів використання балок з гофрованими стінками (Республіка Казахстан [1] – трикутні гофри, Швеція – трапеціодні гофри тощо), проте найбільшого поширення в світі набули балки з синусоїдними стінками. Стінки таких балок можуть мати висоту $h_w = 330, 425, 500, 625, 750, 1000, 1250$ і 1500 мм, ширина полиць може змінюватися від 200 до 430 мм, а їх товщина – від 10 до 30 мм. Параметри гофрування стінки прийняті незмінними для усіх товщин і висот і становлять: $f = 40$ мм – висота хвилі, $m = 155$ мм – довжина хвилі синусоїди (рис. 1). На сьогодні товщина стінки може бути 2,0; 2,5; 3,0 мм, хоча вже є розробки для використання стінок $t_w = 1,5$ мм і навіть 6 мм (для підкранових балок).

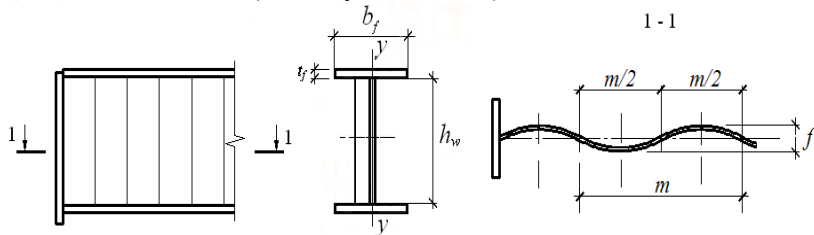


Рис.1. Геометричні параметри елемента

В останні роки з'явилася велика кількість теоретичних і експериментальних робіт, присвячених розрахунку гофрованих синусоїдних стінок на загальну і місцеву стійкість. На сьогодні питання теоретичного розрахунку гофрованих стінок на стійкість вивчено досить глибоко і підтверджено значною кількістю експериментальних досліджень [2, 3].

Теоретичні питання розрахунку поясів елементів з синусоїдними стінками розроблені значно менше, а в експериментальних дослідженнях

використовувалися зразки з таким співвідношенням ширини звису поясів до товщини b_{ef}/t_f , при якому місцева стійкість поясів завідомо забезпечена навіть в балках з плоскими стінками і підтримуючий вплив гофрування не є необхідним [3].

Метою цієї роботи являється розробка методики розрахунку полиць елементів з урахуванням їх жорсткого спряження з поперечно-гофрованими стінками, що дозволить значно збільшити відношення ширини звису полиці b_{ef} до її товщини t_f при умові забезпечення місцевої стійкості полиці. При цьому також збільшиться стійкість полиці при випинанні відносно осі $y - y$ (рис. 1).

З аналітичної точки зору полиця являє собою гладку пластинку, яка жорстко сполучується з гофрованою стінкою по довгій стороні. Враховуючи, що довжина півхвилі гофри a є досить невеликою ($a = m/2 = 155/2 = 77,5$ мм) порівняно з довжиною балки, а висота півхвилі $f/2 = 20$ мм і завжди значно менша ширини звису поясу, для врахування впливу жорсткості гофрованої стінки на критичні напруження поясу в роботі пропонується замінити її гладкою з еквівалентною товщиною, яка становитиме $t_{eq,w} = \sqrt[3]{12I_w/a}$, де I_w – момент інерції півхвилі гофри.

У таблиці 1 наведено значення еквівалентних товщин гофрованих стінок для сортаменту фірми «Zeman» при амплітуді гофри $f=40$ мм і довжині півхвилі $m/2 = 77,5$ мм.

Таблиця 1

t_w	2,0	2,5	3,0
$t_{eq,w}$	17,29	18,63	19,79

Це дозволяє визначити критичні напруження в поясі як в рівномірно стиснутій пластинці шириною b_{ef} , яка пружно защемлена на одному довгому краю і вільна на іншому; по коротких краях пластина вільно оберта.

При таких умовах мінімальні критичні напруження пластинки визначаються за аналітичною формулою [4]:

$$\sigma_{cr}^a = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_{ef}} \right)^2 k_{cr}^a, \tag{1}$$

де $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа - модуль пружності; $\nu = 0,3$ - коефіцієнт Пуассона; $\tau = E_t/E$, де E_t - дотичний модуль; $b_{ef} = b_f/2$, де b_{ef} і t_f - розрахункова ширина звису і товщина полиці (рис. 1). Величина k_{cr}^a в цьому рівнянні, яку далі будемо іменувати коефіцієнтом стійкості за аналітичним методом, є безрозмірною функцією розмірів пластинок (полиці і стінки).

У випадку, коли значення критичних напружень σ_{cr}^a є вищими за межу пропорційності σ_e , в повздовжньому напрямку (вздовж довгої сторони) ефективним буде дотичний модуль E_t , а при $\sigma_{cr} \leq \sigma_e$ - модуль пружності Юнга E . Це означає, що при втраті стійкості в межах пружних деформацій $\tau = 1$.

У формулі (1) коефіцієнт стійкості k_{cr}^a для гладких пластин залежить від коефіцієнта защемлення полиці стінкою.

Виходячи с загально прийнятого положення про те, що гофрована стінка не сприймає поздовжніх зусиль, коефіцієнт защемлення набуває вигляду відношення лінійних моментів інерції полиці і стінки на одиницю довжини у поперечному перерізі:

$$\xi = 4 \frac{h_w}{b_f} \left(\frac{t_f}{t_{eq,w}} \right)^3. \quad 2)$$

Значення k_{cr}^a з необхідною для практичних цілей точністю зручно визначати за табл. 2, яка відповідає графікам роботи [4] при $\xi \leq 1,6$. При проміжних значеннях ξ відповідні значення k_{cr}^a знаходяться за допомогою інтерполяції. При $\xi > 1,6$ коефіцієнт k_{cr}^a визначається за формулою $k_{cr}^a = p + 2\sqrt{q}$, в який $q = 0,061/(0,43 + \xi)$ і $p = 0,425 + 0,016/(0,025 + \xi)$.

Таблиця 2

ξ	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
k_{cr}^a	1,277	1,168	1,095	1,046	1,005	0,969	0,936	0,914	0,892
ξ	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
k_{cr}^a	0,874	0,857	0,840	0,827	0,809	0,794	0,790	0,777	0,771

Теоретично значення ξ можуть змінюватися від 0 до ∞ . При $\xi = 0$ полиця повністю защемлена на краю ($k_{cr}^a = 1,277$), що контактує зі стінкою, а при $\xi = \infty$ вона вільно обертається відносно стінки ($k_{cr}^a = 0,425$).

Розробка аналітичного методу розрахунку на місцеву стійкість полиць з урахуванням реальних умов їх поєднання з гофрованими стінками зустрічає великі математичні складності.

Тому в даній роботі для визначення критичних напружень втрати стійкості поясів в реальних елементах з урахуванням параметрів і форми гофрів використовується метод скінченних елементів (МСЕ), як ефективний і універсальний інструмент чисельного аналізу НДС конструкцій.

Моделювання і чисельні дослідження виконувалися на ЕОМ за допомогою ПК ЛІРА з класичного сімейства «ЛІРА-Windows».

В роботі розглядалися такі основні задачі чисельного аналізу за допомогою МСЕ: побудова математичних моделей для чисельного дослідження елементів ПГС; визначення критичних напружень втрати стійкості поясів при різних станах елементів ПГС і параметрах моделей; порівняння результатів розрахунків за аналітичним методом і методом МСЕ.

Всього було розраховано понад 265 моделей для всього спектру сортаменту фірми «Zeman».

На відміну від розрахунку за аналітичною формулою (1) розрахунок за МСЕ дозволяє визначити критичні напруження втрати стійкості поясів при різних схемах навантаження, а також у випадку моносиметричних перерізів.

Одним з основних результатів досліджень є встановлення досить точної кореляції між критичними напруженнями за аналітичним методом за формулою (1) і за методом скінчених елементів. При аналізі і порівнянні результатів використовувалося відношення $\theta = \sigma_{cr}^a / \sigma_{cr}^a$, яке обчислювалося для всіх розрахункових моделей. Тут σ_{cr}^a - критичні напруження полиці, обчислені ПК ЛІРА за методом МСЕ.

Найбільший практичний інтерес представляють результати розрахунків для тонких полиць з відношенням $b_{ef}/t_f > 15$. Це пояснюється тим, що навіть при шарнірному сполученні пояса зі стінкою ($\xi = \infty$) і $b_{ef}/t_f = 15$ критичні напруження за формулою (1) $\sigma_{cr}^a = 35,15 \text{ кН/см}^2$, і місцева стійкість поясів буде завжди забезпечена для сталей з $R_y \leq 320 \text{ МПа}$.

Виявлена близькість значень критичних напружень за методом МСЕ до критичних напружень за аналітичним методом. Різниця цих значень характеризується відношенням θ , величина якого для більшості моделей більше одиниці і не перевищує, як правило, $\theta = 1,10$. Тільки в області досить тонких полиць ($b_{ef}/t_f \geq 25$) в елементах з невеликою висотою стінки ($h_w = 330$ і 500 мм) відношення θ виявляється меншим за одиницю, однак не менше $0,95$.

Форми втрати стійкості поясами при завантаженні за різними схемами наведені на рис. 2.

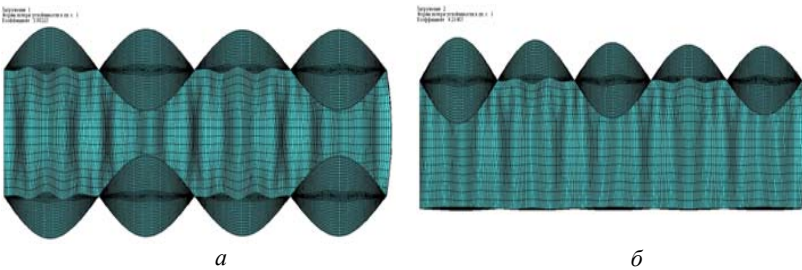


Рис.2. Форми втрати стійкості поясами при різних схемах навантаження: а – центральний тиск; б – позацентровий тиск

Це дозволяє рекомендувати для практичних цілей визначати критичні напруження місцевої втрати стійкості поясів в елементах ПГС за аналітичною формулою (1) з введенням в неї коефіцієнта впливу висоти γ_h

$$\sigma_{cr}^a = k_{cr}^a \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_{ef}} \right)^2 \gamma_h. \quad (3)$$

Залежно від висоти стінки коефіцієнт γ_h слід приймати таким, що дорівнює $0,95$ при $h_w = 330$ і 500 мм , та рівним $1,0$ в інших випадках.

Формула (3) дозволяє після перетворень встановити необхідне значення b_{ef}/t_f і умовну гнучкість звису полиці відповідно до діючих напружень в поясі, $\sigma_f = N_f / A_f$ де N_f і A_f - відповідно розрахункове зусилля в поясі і площа полиці:

$$\bar{\lambda}_{uf} = \frac{b_{ef}}{t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 0,95 \sqrt{k_{cr}^a \gamma_h \frac{R_y}{\sigma_e}} \sqrt[4]{\tau}. \quad (4)$$

Якщо $\sigma_f < \sigma_e = 0,8R_y$, то сталь працює в межах пружних деформацій, і $\tau = 1$. При $\sigma_f > 0,8R_y$, необхідно встановити відповідне значення τ . Приймаючи, що залежність між критичними напруженнями загальної втрати стійкості полиці $\sigma_{cr} = \sigma_f = \varphi R_y$, відносно осі $y - y$ (рис. 1), як окремого елемента, і гнучкістю відповідає квадратній параболі [4], значення τ буде мати вигляд:

$$\tau = \left(\frac{R_y - \sigma_{cr}}{R_y - \sigma_e} \right) \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_e} = \frac{(R_y - \sigma_{cr})\sigma_{cr}}{0,16R_y^2}. \quad (5)$$

Аналіз результатів чисельних досліджень дозволів встановити для полиць, які розглядаються як центрально-стиснуті елементи, максимальну граничну гнучкість звису полиці за формулою

$$\bar{\lambda}_{uf} = 0,59 + 0,1\bar{\lambda}, \quad (6)$$

де $\bar{\lambda}$ - умовна гнучкість полиці як окремого стержня відносно осі $y - y$.

Висновки. Встановлено, що основними параметрами, які визначають критичне напруження втрати стійкості полиць елементів з гофрованими стінками, є відношення ширини звису до товщини b_{ef}/t_f і коефіцієнт защемлення полиці стінкою ξ .

У більшості випадків відношення θ наближається до одиниці і тільки для елементів зі стінками висотою 1250 і 1500 мм сягає 1,10...1,12. Це означає, що для практичних цілей розрахунків поясів елементів ПГС з достатньою точністю можна вести за формулами (3) і (4), замінюючи гофровану стінку еквівалентною за жорсткістю плоскою з товщиною $t_{eq,w}$.

Враховання жорсткості стінки дозволяє збільшити допустиме значення b_{ef}/t_f в $\sqrt{k_{cr}^a}/0,425$ раз як в області пружної, так і в області пружно-пластичної роботи сталі.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. СНиП РК 5.04-23-2002. Стальные конструкции. Нормы проектирования. Комитет по делам строительства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан. Астана 2003. – 118 с.
2. Eurocode 3: Design of steel structures; Part 1-5: Plated structural elements.
3. Krzysztof Kuchta: Zum Einfluß der Interaktion von Biegemoment und Querkraft auf das Tragverhalten von Wellstegtragern. Stahlbau 75 (2006), Heft 7, S. 573-578.
4. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. – М.: Физматгиз, 1959. – 544 с.