

УДК 624.072.2.014.2-415:624.075.4

## Стійкість поперечно-гофрованих синусоїдних стінок двотаврових балок за межею пружності

Нілов О.О., к.т.н, Лавріненко Л.І., к.т.н, Нілова Т.О., к.т.н.,  
Семчук І.Ю.

Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Україна

**Анотація.** Викладається аналітичний метод розрахунку поперечно-гофрованих синусоїдних стінок сталевих двотаврових балок при зсуві в зоні пружно-пластичних деформацій. Стінка розглядається як ортотропна нескінченно довга пластина, що шарнірно оперта по чотирьох сторонах. Отримана аналітична формула для визначення критичних напружень зсуву стінки з урахуванням її параметрів і розрахункового опору сталі. Теоретичні результати розрахунку порівнюються з експериментальними, відомими з різноманітних наукових джерел.

**Аннотация.** Излагается аналитический метод расчета поперечно-гофрированных синусоидных стенок стальных двутавровых балок при сдвиге в области упруго-пластических деформаций. Стенка рассматривается как ортотропная бесконечно длинная пластина, шарнирно опертая по четырем сторонам. Получена аналитическая формула для определения критических напряжений сдвига стенки с учетом ее параметров и расчетного сопротивления стали. Теоретические результаты расчета сопоставляются с экспериментальными, известными из различных научных источников.

**Abstract.** The analytical method is described concerning calculation of the transversely corrugated sinusoidal webs of steel I-beams under the shear in the region of elastic-plastic deformations. The web is considered as an infinitely long orthotropic plate simply supported pivotally on the four sides. The analytical formula for determining the critical shear stress of the web subject to its parameters and the design steel resistance is obtained. Theoretical analysis results are compared with experimental ones known from various scientific sources.

**Ключові слова:** гофрована синусоїдна стінка, стійкість стінки при зсуві, пружно-пластичні деформації, порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

Успішне поширення досвіду застосування балок з синусоїдними поперечно-гофрованими стінками вимагає подальшого обговорення та удосконалення методів їх розрахунку для ефективного використання у практиці будівництва легких металевих конструкцій [1–4].

Ефективність такого виду профілів доведена досвідом їх застосування: гофрування стінки дозволяє збільшити її стійкість при зсуві та, як наслідок, – без додаткових ребер зменшити товщину стінки та знизити витрати сталі порівняно з двотаврами з плоскими стінками; елементи з гофрованими стінками є більш жорсткими в поперечному напрямку, що важливо при їх перевезенні та монтажі, а також більш естетичними.

Балки з поперечно-гофрованими стінками на теренах колишнього СРСР вперше з'явилися у 80–90-х роках минулого сторіччя, було налагоджене виробництво та розроблена методика їх розрахунку, а проектування балок з поперечними гофрами трикутної форми вперше було введено до державних норм Республіки Казахстан [2]. Такий вид гофрування в подальшому не набув значного поширення та використовується переважно для конструкцій регіонального застосування. В подальшому впроваджуються технології виготовлення та розробляються методи розрахунку двотаврів із стінкою, вигнутою по хвилі синусоїди (Sin-балки), та з трапецеїдально-гофрованою стінкою. В європейській практиці проектування балок з гофрованими стінками розглядаються всі види гофрування, при цьому надається перевага трапецеїдальному гофруванню як такому, що дозволяє застосовувати балки високої несучої спроможності та двостінчасті [4]. Відоме конструктивне рішення віадука з центральним прогоном 115 м в Ільменау (Німеччина), побудованого із застосуванням балок змінної висоти з трапецеїдально-гофрованими стінками заввишки 2,8...6,0 м.

**Актуальність проблеми.** В Україні широкого застосування набули Sin-балки завдяки впровадженню технології фірми «Zeman» (Австрія), яка передбачає високотехнологічне виготовлення балок відносно неширокого сортаменту, в усякому разі, стосовно стінок: безвідходне використання листових заготовок шириною 1500 мм дозволяє отримувати стінки з висотою, кратною до вихідної. Крок гофрування  $m = 155$  мм при розгорнутій довжині напівхвилі гофру  $s \approx 90$  мм зберігається сталім. Гофрування для товщини стінки  $t_w = 2$  мм та 2,5 мм виконується з амплітудою  $f = 40$  мм, а для  $t_w = 3$  мм – з амплітудою  $f = 43$  мм. При такому звуженні конструктивних параметрів виникає можливість певного спрощення робочих формул за рахунок обмеження області їх застосування, що й було реалізовано в деяких випадках в [4], та про що згадаємо далі.

Багато робіт, представлених у науковій літературі з питань роботи елементів з поперечно-гофрованими синусоїдними стінками, присвячено дослідженню гофрованих стінок на стійкість при зсуві. Серед таких роботи Peterson та Cord (1960), Rothrell (1968), Sherman та Fisher (1971), Easley (1975), Libove (1977), Lindner (1988), Elgaaly (1990), Abbas (2006) та інші. Були отримані теоретичні або ж напівемпіричні формули для визначення критичного навантаження, що спричиняє втрату стійкості стінки при зсуві в пружній області роботи. Цій же проблематиці присвячені роботи Г. А. Ажермачова, В. В. Бирюльова, А. М. Степаненка, І. С. Рибкіна, П. І. Єгорова, О. О. Лукіна, М. В. Лазнюка.

Подальше дослідження балкових елементів з поперечним гофруванням тонкої стінки для пошуку резервів несучої здатності вбачається в уточненні розрахункового апарату стосовно роботи стінки з врахуванням її стійкості при зсуві. Цьому сприяє введення в державні норми проектування України глави 24 ДБН В.2.6-198:2015 [1], в якій містяться основні вимоги до проектування і розрахунку несучих двотаврових елементів з поперечно-гофрованими синусоїдними стінками.

**Мета дослідження.** В цій роботі ми ставимо за мету уточнити роботу поперечно-гофрованої синусоїдної стінки з врахуванням втрати стійкості в пружно-пластичній області, оскільки у згаданому вище нормативному документі [1] розрахунок стінки на стійкість при зсуві розглядається в межах пружної роботи сталі, або ж певним чином враховуються деякі нелінійні фактори [3].

Далі також буде наведено порівняння отриманих теоретичних даних з даними експериментальних досліджень інших авторів, наявними у відкритих джерелах, що, на нашу думку, є важливим для більш впевненого аналізу проблеми.

Балкові профілі з поперечно-гофрованою стінкою є різновидом тонкостінних зварних двотаврів, проте, на відміну від них, для цього виду профілів характерним є розмежування роботи стінки та полиць, при якому стінка вважається такою, що працює переважно на зсув, та згідно з чинними нормами [1] при  $\sigma_{loc} = 0$  загальна стійкість стінки вважається забезпеченою при виконанні умови:

$$\tau_{xy} / \tau_{cr} \leq \gamma_c, \quad (1)$$

де  $\tau_{cr}$  – найменше критичне значення дотичних напружень втрати стійкості стінки.

Слід розрізняти дві форми втрати стійкості стінки при зсуві:

- загальну форму втрати стійкості при напруженнях  $\tau_{g,cr}$  з утворенням похилої складки, що перетинає декілька гофрів, а випинання концентруються по вершинах гофрів (рис. 1);
- місцеву форму втрати стійкості при напруженнях  $\tau_{l,cr}$  з випинанням лише на деяких ділянках гофрів.



Рис. 1. Загальна втрата стійкості синусоїдно-гофрованої стінки при зсуві.  
Експериментальні дослідження на кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій  
КНУБА (м. Київ)

Так само, як і у чинних нормах України [1], де рекомендується дотримання вимоги:

$$\tau_{l,cr} > \tau_{g,cr}, \quad (2)$$

коментарями до Європейських норм EN 1993-1-5 [4] таке співвідношення для синусоїдно-гофрованих стінок також вважається щонайбільш імовірним, і тому подальші міркування будуть викладені стосовно  $\tau_{g,cr}$ .

Існує декілька методик визначення критичних дотичних напружень у поперечно гофрованих стінках. Для аналітичного опису напруженого стану синусоїдної стінки найбільш придатною вважається теорія ортотропних пластин, згідно з якою стінка розглядається як нескінченно довга ортотропна смуга з головними напрямками, паралельними до сторін смуги, завантаженої по сторонах дотичними напруженнями [5]. За таких припущень використовується рішення Зейделя для випадку пластини, вільно обпертої або защемленої по краях:

$$\tau_{cr} = \frac{4C}{h_w^2 t_w} \sqrt[4]{D_1 D_2^3},$$

де  $D_1$  та  $D_2$  – жорсткості ортотропної пластини при згині по головних напрямках.

Коефіцієнт  $C$  залежить від граничних умов спирання пластини. В роботі [5] вказується, що жорстке спирання пластини по поздовжніх краях практично не впливає на величину критичних напружень, і при шарнірному спиранні  $C = 8,125$ . Тому в області пружної роботи сталі критичні дотичні напруження  $\tau_{g,cr}$  втрати загальної стійкості синусоїдно-гофрованої стінки визначаються за формулою:

$$\tau_{g,cr} = \frac{32,4}{h_w^2 t_w} \sqrt[4]{D_1 D_2^3}, \quad (3)$$

де жорсткості ортотропної пластини  $D_1$  та  $D_2$  обчислюються як:

$$D_1 = \frac{E t_w^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{m}{2s}; \quad D_2 = \frac{EI}{m}. \quad (4)$$

Тут  $I$  – момент інерції однієї хвилі гофру довжиною  $m$  при розгорнутій довжині напівхвилі  $s$  відносно поздовжньої осі стінки. Для стінок Zeman при  $f = 40$  мм моменти інерції показані в табл. 1.

Таблиця 1

**Моменти інерції синусоїдно-гофрованих стінок**

$t_w$ , мм	2,0	2,5	3,0
$I$ , см <sup>4</sup>	6,674	8,347	10,012

Якщо загальна втрата стійкості стінки відбувається при  $\tau_e < \tau_{cr} < \tau_y$ , то формула (3) має бути відкоригована з урахуванням впливу пластичних деформацій.

**Постановка задачі.** Виходимо з того, що згідно з умовою пластичності Губера-Мізеса-Генки вираз для інтенсивності напружень для плоского напруженого стану при чистому зсуві ( $\sigma_x = \sigma_y = 0$ ) має вигляд  $\sigma_i = \tau_{xy} \sqrt{3}$ , а також  $\sigma_i = \tau_{cr} \sqrt{3}$ , у припущенні ізотропної поведінки ортотропної пластини в пружній області випинання, що означає допустимість застосування формули (3) як у пружній, так і в пружно-пластичній областях за умови використання в непружній області деякого приведенного модуля [5], тобто  $\tau_{cr} = \eta \tau_{g,cr}$ .

В якості хорошої апроксимації в [5] пропонується коефіцієнт впливу пластичних деформацій в області пружно-пластичної роботи

$\eta = \sqrt{\tau_E} = \sqrt{\frac{E_t}{E}}$ , де  $E_t$  – дотичний модуль. У цитованій роботі показано,

що доречність використання саме коефіцієнта  $\sqrt{\tau_E}$  полягає в тому, що один і той самий коефіцієнт використовується для пластин як при дії нормальних напружень, так і при дії зсуву. Після підстановки вказаних співвідношень маємо:

$$\sigma_i = \tau_{g,cr} \sqrt{3} \cdot \sqrt{\tau_E}, \quad \text{або} \quad \frac{\sigma_i}{\sqrt{\tau_E}} = \tau_{g,cr} \sqrt{3}, \quad (5)$$

де  $\tau_{g,cr}$  – критичне дотичне напруження за (3).

При цьому коефіцієнт набуває значень  $\sqrt{\tau_E} = 1,0$  на межі пропорційності, а його значення при пружно-пластичному випинанні добре апроксимуються таким чином [5]:

$$\tau_E = \frac{(\sigma_y - \sigma_{cr})\sigma_{cr}}{(\sigma_y - \sigma_e)\sigma_e}, \quad (6)$$

де  $\sigma_y$ ,  $\sigma_e$  та  $\sigma_{cr}$  – відповідно, нормальні напруження на границі текучості, на межі пропорційності та критичні в пружно-пластичній області випинання.

Для практичних розрахунків з уведенням позначення  $\sigma_y = R_{yw}$  (де  $R_{yw}$  – розрахунковий опір на границі текучості стінки), а також вважаючи відношення межі пропорційності до границі текучості  $\sigma_e/\sigma_y = 0,8$  та  $\tau_e/\tau_y = 0,8$  сталим [1], значення коефіцієнта  $\tau_E$  можемо записати як [6]:

$$\tau_E = \frac{(R_{yw} - \sigma_i)\sigma_i}{0,2R_{yw} \cdot 0,8R_{yw}} = \frac{(R_{yw} - \sigma_i)\sigma_i}{0,16R_{yw}^2}. \quad (7)$$

Таким чином, задача полягає у визначенні рівня напружень випинання стінки  $\sigma_i$  та переході до критичних дотичних напружень в пружно-пластичній області:

$$\tau_{cr} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}. \quad (8)$$

Для запису рішення вводимо позначення:

$$c = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\tau_E}}, \quad (9)$$

та для спрощення запису позначимо:

$$D = \frac{c^2}{0,16R_{yw}^2}, \quad (10)$$

після деяких перетворень:

$$\sigma_i = \frac{DR_{yw}}{1+D}. \quad (11)$$

Практично задача вирішується таким чином: беручи до уваги, що за (5)

$\sigma_i = \tau_{g,cr} \sqrt{3} \cdot \sqrt{\tau_E}$ , де  $\tau_{g,cr}$  – критичні дотичні напруження за (3),

підставляємо це значення у (9) та обчислюємо  $c = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\tau_E}} = \tau_{g,cr} \sqrt{3}$ . Далі

визначаємо  $D$  за (10),  $\sigma_i$  – за (11) та критичні дотичні напруження

стілки з урахуванням пружно-пластичної роботи – за (8):  $\tau_{cr} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}$ .

Отримане рішення дозволяє виконати перевірку стійкості стінки в пружно-пластичній області за (1), а також визначити несучу спроможність стінки при зсуві:

$$Q = \tau_{cr} A_w, \quad (12)$$

де  $\tau_{cr}$  – менше критичне напруження за (1) або (8),  $A_w = h_w t_w$  – площа стінки.

Ефективною перевіркою теоретичних результатів за запропонованою методикою є порівняння їх з експериментальними результатами, отриманими різними авторами та існуючими даними інших досліджень. Така перевірка дозволяє неупереджено оцінити отримані результати. Для зручності порівняння результатів будемо використовувати понижувальний коефіцієнт втрати стійкості при зсуві для відповідного значення поперечної сили

$$\chi_i = \frac{Q_i}{A_w R_{sw}} = \frac{\tau_{i,cr}}{R_{sw}}, \quad (13)$$

а також несучу спроможність стінки за (12).

Методикою Єврокоду 3 при зсуві передбачається визначення коефіцієнта зниження дотичних напружень загальної втрати стійкості стінки  $\chi_{EN}$  для  $\tau_{g,cr} \leq R_{sw}$  таким чином:

$$\chi_{g,EN} = \frac{1,5}{0,5 + \lambda_g^2} \leq 1,0, \quad (14)$$

де

$$\lambda_g = \sqrt{\frac{R_{yw}}{\tau_{g,cr} \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{R_{sw}}{\tau_{g,cr}}}, \quad (15)$$

де  $\tau_{g,cr}$  – значення критичних напружень за (3). Хоча у [4] зазначено, що формула не є достатньо загальною та може давати деяку похибку при параметрах гофрування, відмінних від австрійських, через що рекомендується визначати критичні напруження із застосуванням МСЕ

Критична перерізувальна сила при цьому становить

$$Q_{EN} = \chi_{EN} \frac{R_{yw}}{\sqrt{3}} h_w t_w, \quad (16)$$

де  $\chi_{EN}$  – за (14).

**Апробація результатів.** У даній роботі для перевірки результатів запропонованої методики розрахунку синусоїдних стінок за сортаментом технології Zeman на загальну стійкість при зсуві були використані експериментальні результати ряду робіт, опублікованих в зарубіжних наукових виданнях.

Значення критичних дотичних напружень та понижувальних коефіцієнтів  $1,0 > \chi > 0,8$ , що отримані експериментально та наведені в таблиці 2, свідчать про пружно-пластичне випинання стінки практично в кожному наведеному випадку, бо, вважаючи відношення межі пропорційності до границі текучості  $\sigma_e/\sigma_y = 0,8$  сталим та  $\tau_e/\tau_y = 0,8$  [1], а напруження на

межі пропорційності  $\tau_e = \frac{R_y \cdot 0,8}{\sqrt{3}} = 0,462 R_y$ , можна показати, що в наведених експериментах теоретичні критичні дотичні напруження  $\tau_{g,cr}$  вищі за межу пропорційності, та при  $\tau_e < \tau_{cr} < \tau_y$  мають коригуватися понижувальним коефіцієнтом за (13).



Дані експериментів, наведені в таблиці 2, включають три серії експериментів. Нами розглянуті й проаналізовані результати експериментальних досліджень серії коротких моделей з 6 зразків (моделі 1–6), виготовлені фірмою «Zeman» та досліджені в університеті Tsinghua (Китай) [7]. Матеріали для стінок і поясів прийняті зі сталі S295SR згідно з EN 10025 з границею текучості  $R_y = 300$  МПа, незалежно від товщини сталі. Стінки були з'єднані з поясами однобічними кутовими швами, які виконувалися роботами. Експериментально досліджені недовгі та невисокі двотаврові балки з переважно невисокими гнучкостями стінок  $\lambda_w \leq 400$  бісиметричного перерізу з хвилястими стінками товщиною від 2,0 до 3,0 мм. Ті самі моделі були розраховані за МСЕ, результати їх теоретичних розрахунків та експериментальних випробувань при навантаженні однією поперечною силою наведені в [7].

Моделі 7–9 прийняті за роботою [4], ілюструють використання методики розрахунку за Єврокодом 3 і дозволяють визначити вплив збільшення гнучкості стінки до  $\lambda_w = h_w / t_w = 1505/2,1 = 716$ .

Моделі 10–11 взяті за роботою [8], де наводяться результати випробувань балок з синусоїдно-гофрованими стінками. Мета цього експерименту була дещо іншою і полягала у вивченні впливу довжини балки на критичні зусилля, проте стінки балок зруйнувалися за механізмом втрати загальної стійкості, і тому ці результати взяті нами до уваги.

В таблиці 2 наведені також теоретичні результати (моделі 12–15), опрацьовані нами згідно з Єврокодом 3, а також за запропонованою методикою.

Таблиця містить значення несучої спроможності стінки та деякі інші параметри для кожної з моделей, що аналізуються:  $Q_{test}$  – експериментальні значення критичної поперечної сили;  $Q_{FE}$  – критичні значення поперечної сили, отримані авторами експерименту шляхом розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням комплексу ANSYS;  $Q_{EN}$  – розрахункові значення поперечної сили, отримані за формулами EN;  $Q_{cal}$  – теоретичні значення, отримані за методикою, що обговорюється.

Таблиця 2

Експериментальні дані та результати тестових розрахунків

Джерело	№ моделі	Довжина балки $l, \text{м}$	Розміри моделі, мм	$R_{\text{тис}}$ кН/см <sup>2</sup>	$A_{\text{н}}$ см <sup>2</sup>	$\lambda_{\text{н}}$	$\tau_{\text{ср}}$ за (3) кН/см <sup>2</sup>	Дані про несучу спроможність (кН) та коефіцієнти стійкості при пружно-пластичному виниранні											
								експериментальні		МСЕ		за нормами Єврокоду 3		за обговорюваною методикою					
								$Q_{\text{нп}}$	$\chi_{\text{нп}}$	$Q_{\text{FE}}$	$\chi_{\text{FE}}$	$Q_{\text{EN}}$	$\chi_{\text{EN}}$	$X_{\text{EN}}$	$X_{\text{EN}}$	$\tau_{\text{ср}}$ кН/см <sup>2</sup>	$Q_{\text{нп}}$	$\chi_{\text{нп}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
[7]	1	1,5	WTA 500x200x10	30,0	10,0	250	109,83	190,5	1,095	171,5	0,986	173,2	1,0	17,25	172,5	0,991			
	2	1,5	WTB 500x200x10	30,0	12,5	200	122,84	238,5	1,097	215,5	0,991	216,5	1,0	17,27	215,9	0,992			
	3	1,5	WTB 750x220x12	30,0	18,75	300	54,60	324,0	0,993	321,5	0,985	324,75	1,0	17,05	319,5	0,979			
	4	1,5	WTC 750x250x12	30,0	22,5	250	59,79	388,5	0,992	383,0	0,978	387,70	1,0	17,09	384,5	0,982			
	5	2,0	WTB 1000x300x12	30,0	25,0	400	30,71	428,5	0,985	420,5	0,967	433,00	1,0	16,50	412,5	0,948			
	6	2,0	WTC 1000x300x12	30,0	30,0	333	33,63	494,0	0,946	504,0	0,966	519,60	1,0	16,62	498,5	0,955			
[4]	7		$\lambda_{\text{н}}=2,1$ $h_{\text{н}}=1502$	22,5	31,542	715	12,46	370,0	0,893	-	-	398,57	0,972	11,128	351,0	0,853			
	8		$\lambda_{\text{н}}=2,1$ $h_{\text{н}}=1501$	22,5	31,152	715	12,46	365,0	0,887	-	-	393,64	0,972	11,145	351,3	0,854			
	9		$\lambda_{\text{н}}=2,1$ $h_{\text{н}}=1505$	22,5	31,605	717	12,46	353,0	0,856	-	-	399,36	0,972	11,144	352,2	0,854			
[8]	10	1,9	$\lambda_{\text{н}}=2,1$ $h_{\text{н}}=500$	31,1	10,5	238	121,18	180,0	0,949	-	-	188,48	1,0	17,88	187,74	0,991			
	11	5,0	$\lambda_{\text{н}}=2,5$ $h_{\text{н}}=500$	26,2	12,5	200	122,84	180,0	0,948	-	-	189,13	1,0	15,08	188,5	0,992			
Розрахункові дані	12		WTB 1250x300x12	30,0	31,25	500	19,65	-	-	-	-	541,25	1,0	15,40	481,25	0,885			
	13		WTC 1250x300x12	30,0	37,50	417	212,52	-	-	-	-	649,50	1,0	15,695	588,56	0,902			
	14		WTB 1500x300x12	30,0	37,50	600	13,65	-	-	-	-	550,78	0,848	13,77	516,37	0,751			
	15		WTC 1500x300x12	30,0	45,0	500	14,95	-	-	-	-	704,58	0,904	14,257	641,56	0,819			

Примітки: 1. Маркування балок Zelman за гошиною стінки: WTA – 2,0 мм, WTB – 2,5 мм, WTC – 3,0 мм, інші розміри стосуються польщі.

Відзначимо, що в перших шести моделях [7] розрахунковий опір сталі вказаний однаковим для стінки і поясів і становить  $R_y=300$  МПа, товщина стінок  $t_w$  становить 2,0; 2,5 і 3,0 мм, тобто точно відповідає сортаменту Zeman. Як показує практика, розрахунковий опір сталі в стінках і поясах завжди відрізняється внаслідок різниці товщин і марок сталі, що може певною мірою впливати на результати розрахунку. Необхідно також більш точно вказувати товщини поясів, які, як правило, мають відхилення від номінальних згідно з допусками за стандартами прокату. На це явно вказують товщини стінок і механічні характеристики в моделях [4, 8].

Як найбільш достовірні для порівняння прийняті значення  $\chi_{test}$ , які враховують всі особливості роботи реальної моделі і умови навантаження, проте не слід забувати про вплив залишкових напружень від зварювання і наклепування матеріалу стінки, геометричних недосконалостей форми тощо.

Аналіз таблиці 2 свідчить про збіг наших результатів з тими даними, що отримані не тільки в результаті експерименту, а й тими, що обчислені при моделюванні хвилястої стінки МСЕ. При цьому значення коефіцієнтів  $\chi_{EN}$  за нормами Єврокоду [3] наближаються до експериментальних даних переважно в області невисоких гнучкостей стінки  $\lambda_w \leq 500$  і є найвищими. Отримані теоретичні результати підтверджені експериментальними даними та свідчать, що у більшості випадків при гнучкостях  $\lambda_w \leq 700$  втрата загальної стійкості стінки при зсуві відбувається в пружно-пластичній стадії при напруженнях  $\tau_{cr} > \tau_e$ , що створює необхідність використання редукованого значення  $\tau_{g,cr}$ , замість значення (3), наведеного в нормах проектування, а й про дещо завищені (на 5...10 % порівняно з експериментальними) значення коефіцієнта редукації за нормами Єврокоду 3.

## Висновки

Розроблено аналітичний метод визначення критичних дотичних напружень в синусоїдно-гофрованих стінках двотаврових балок, що показав впевнений збіг з результатами натурних експериментів, проведених різними авторами, а також числовими дослідженнями із застосуванням комплексу ANSYS. Він є простим і лаконічним, що дає змогу застосовувати такий метод в практичних розрахунках в широкому діапазоні гнучкостей стінки. Отримані значення критичного дотичного напруження в ряді випадків є нижчими, ніж за методикою Єврокоду 3, що є додатковою підставою для виконання перевірки стійкості стінки за (1) з урахуванням критичних напружень при пружно-пластичній роботі за (8).

## **Література**

- [1] Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014 – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України Київ, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
- [2] Строительные нормы и правила РК. Стальные конструкции. Нормы проектирования : СНиП РК 5.04-23-2002 . – Изд. офиц. – Взамен СНиП П-23-81 ; введ. с 01.04.03. – Астана : [б. и.], 2003. – 118 с. – (Гос. нормативы в обл. архитектуры, градостроительства и стр-ва).
- [3] Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструктивні елементи (EN 1993-1-5:2006, IDT) : ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012 : проект / ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського»; ТК 301 «Металобудівництво». – Електронні дані. – К. : «НОРМАТИВ™ PRO». – (Нормативно-правове забезпечення діяльності проектних і будівельних організацій України).
- [4] Johansson B. Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated Structural Elements / [B. Johansson, R. Maquoi, G. Seldasek, C. Muller, D. Beg] // JRS Scientific and Technical Reports. – 2007. – P. 152–167.
- [5] Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций / Ф. Блейх. – М. : Физматгиз, 1959. – 544 с.
- [6] Нілова Т. О. Аналітичний метод розрахунку на місцеву стійкість поясів елементів з поперечно-гофрованими стінками / Т. О. Нілова // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. – 2014. – Випуск 13. – С. 68–75.
- [7] Guo Yan-lin. Flange buckling behavior of the H-shaped member with sinusoidal webs / [Guo Yan-lin, Zhang Qing-lin, Siokola, W., Hofer, A.] // Fifth International Conference on Thin-Walled Structures. – Brisbane, Australia, 2008. – 8 p.
- [8] Krzysztof Kuchta. Zum Einfluß der Interaktion von Biegemoment und Querkraft auf das Tragverhalten von Wellstegtragern // Stahlbau. – 2006. – № 7. – S. 573–578.

*Надійшла до редколегії 09.09.2016 р.*