

УДК 624.014

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК З ПОПЕРЕЧНО-ГОФРОВАНОЮ СТІНКОЮ З УРАХУВАННЯМ ПОЧАТКОВИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ БАЛОК С ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ

NUMERICAL RESEARCH OF BEARING CAPACITY OF STEEL BEAMS WITH CROSS-CORRUGATED WEB INCLUDING INITIAL IMPERFECTIONS

Нілов О.О., к.т.н., проф., Нілова Т.О., к.т.н., доц. (Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна)

Нилов А.А., к.т.н., проф., Нилова Т.А., к.т.н., доц. (Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина)

Nilov A.A., candidate of technical sciences, professor, Nilova T.A., candidate of technical sciences, associate professor (Kiev National University of Construction and Architecture, Ukraine)

Наведені результати чисельного дослідження за МСЕ впливу геометричних недосконалостей (зміщення поздовжньої осі стінки) на несучу здатність сталевих двотаврових елементів з поперечно-гофрованими стінкою.

Изложены результаты исследования влияния геометрических несовершенств (смещение продольной оси стенки) на несущую способность двутавровых элементов с поперечно-гофрированной стенкой с использованием МКЭ.

The results of influence researches of the geometric imperfections (longitudinal axis offset of the web) on the bearing capacity of steel I-section elements with cross-corrugated web using the finite element method are represented.

Ключові слова:

Гофрована стінка, плоскі пояси, початкові недосконалості, несуча здатність. Гофрированная стенка, плоские пояса, начальные несовершенства, несущая способность.

Corrugated web, flat flanges, initial imperfections, bearing capacity.

Актуальність роботи. Балки з поперечно-гофрованими стінками (далі ПГС) відносяться до тонкостінних конструкцій, в яких гнучкість стінки значно перевищує нормативні значення для балок з плоскими стінками. В таких балках вплив початкових недосконалостей на несучу здатність суттєво збільшується. На сьогодні в вітчизняних і європейських нормах проектування відсутні рекомендації по обмеженню величини початкових недосконалостей форми конструкції.

Мета роботи. Встановити на основі чисельних досліджень вплив початкових недосконалостей на несучу здатність елементів з ПГС.

Основна частина. В роботах [1, 2] розроблена методика і наведені результати чисельного дослідження фізичних моделей балок з ПГС за методом скінчених елементів (МСЕ) за лінійною і нелінійною теорією з урахуванням фізичної і геометричної нелінійності роботи сталі з використанням програмного комплексу ЛИРА. При цьому було встановлено, що при гнучкості стінки $\lambda_w \leq 500$ і ширині звису поясу $b_{ef}/t_f < 18$ критичні напруження місцевої стійкості поясів за геометрично–лінійною і нелінійною теорією майже збігаються. Проте теорія розрахунку тонких оболонок та пластин, на яку спирається більшість практичних розрахунків, як правило, дає результати, які значно різняться від даних експериментів, притому, не в запас стійкості. Пояснюється це тим, що тонкостінні пластинки та оболонки виявилися дуже чутливими з точки зору їхньої стійкості до початкових дефектів і пошкоджень їхньої геометричної форми, а також до початкових напружень. Адже відомо, що у порівнянні з ідеальною пластиною величина напружень в пластині, яка завантажена в своїй площині і має початкові недосконалості, може суттєво зростати, при цьому переміщення збільшуються в декілька разів [3]. Доцільно відзначити, що ідеалізовані системи взагалі не можуть бути піддані дослідно–експериментальній перевірці [4].

Вперше питання впливу початкових недосконалостей на стійкість аналізувалося в роботах Флюгге, який ввів в лінійні рівняння стійкості додаткові члени, що залежать від початкового прогину.

До основних причин невідповідності дослідних даних та теоретичних значень Григолюк і Мамай [5] відносять: початкові недосконалості форми, початкові напруження в оболонках, відмінність реальних граничних умов від прийнятих при розрахунку, умови завантаження (характер прикладення навантаження), неврахування непружної поведінки матеріалу, згущення власних частот коливань для достатньо тонкостінних оболонок.

Початкові недосконалості можна задавати на основі реальних обмірів конструкції, щоб потім можна було б провести розрахунок на стійкість з заданим розподілом геометричних недосконалостей. Цей підхід важливий з теоретичної точки зору для пояснення причин можливих розходжень між теорією та експериментом. Недоліком цього методу являється те, що він малопродуктивний із-за складності форм оболонок (зокрема, тонких

гофрованих стінок) і труднощів проведення ретельних обмірів конструкції елементів з ПГС.

На сьогодні в Україні розроблено і підготовлено до видання проект першої редакції ДСТУ-Н Б В.2.6-XXX:201X «Правила виготовлення сталевих будівельних конструкцій», в якому сформульовані нормативні вимоги до точності виготовлення сталевих конструкцій. Проте, в даній роботі відсутні вимоги до недосконалостей виготовлення конструкцій з ПГС.

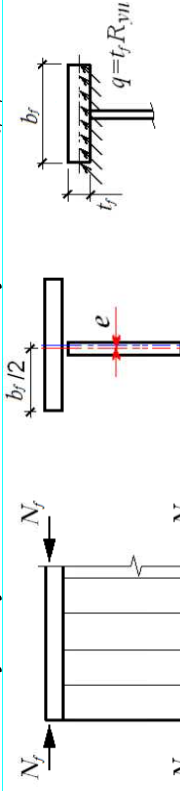
Всі фактори недосконалостей конструкцій за своєю природою являються випадковими і на сьогодні залишаються статистично досліджуваними.

Внутрішні напруження, викликані зварюванням, мають локальний характер, можуть досягати межі текучості сталі і, таким чином, впливати на втрату місцевої стійкості елементів.

Розглядаючи вплив напружень і деформацій від зварювання, слід очікувати, що тонкостінність стінки, особливо гофрованої, зменшує їх вплив на загальний напружено-деформований стан (НДС) конструкцій.

В даній роботі досліджується вплив зміщення осі гофрованої стінки з поздовжньої осі фізико-математичної моделі на критичні напруження місцевої стійкості поясу. Розглядаються два типа моделей з різними схемами їх завантаження, для поясів і стінки в обох випадках був прийнятий матеріал з межею текучості $R_{\text{ст}} = 240$ МПа.

В моделі першого типу (рис. 1, а) досліджується вплив зміщення осі стінки з поздовжньої осі балки при центральному стиску, коли критичні напруження, як показано в роботі [2], є мінімальними. Поздовжні зусилля в поясах прикладалися як рівномірно-розподілені по ширині поясів (рис. 1, в). Для дослідження моделі були прийняті зі стінками $h_w \times t_w = 625 \times 3$ мм, а пояси мали розміри $b_p \times t_p = 400 \times 12,5$ мм і $b_p \times t_p = 300 \times 9,375$ мм. Таким чином, гнучкість звису поясу в обох моделях цього типу становила $b_{\text{ст}}/t_p = 16$.



при $\sigma \leq \sigma_e$ ($\sigma_e = 0,8R_y$):

$$\sigma = \varepsilon E; \quad \tau = \gamma G;$$

при $\sigma_e \leq \sigma \leq R_y$ ($0,8R_y < \sigma \leq R_y$):

$$\sigma = \varepsilon E_c; \quad \tau = \gamma G_c;$$

$$\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_y$$

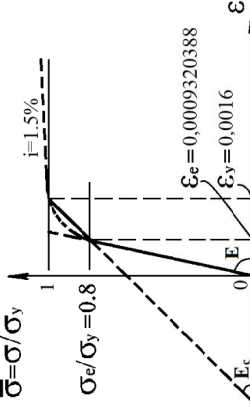


Рис 2. Кусочно-лінійна діаграма роботи пластичної сталі σ – ε

При максимальному зміщенні осі стінки на 5 мм ширина звису поясу $b_f = 300$ мм з одного боку збільшується і стає $b_{ef} = 0,5b_f + 5 = 155$ мм, з протилежного боку зменшується і стає 145 мм. Для моделі з поясом $b_f = 400$ мм розміри звису поясів становили 205 і 195 мм відповідно. При цьому зміна ширини звису становить $(155 - 150) / 150 = 3,3\%$ для поясу з $b_f = 300$ мм і $2,5\%$ для поясу з $b_f = 400$ мм.

За вимогами [6] зміщення осі плоскої стінки відносно осі полиці не повинно перевищувати 0,5 товщини стінки або $0,01 h_w$.

За результатами розрахунку для всіх моделей першого типу отримано коефіцієнт критичних напружень $k_{cr}^n = \sigma_{cr}^n / R_{yn} = 0,96$, який не відрізняється від значень для ідеалізованих моделей.

Порівняння нормальних напружень в поясах ідеалізованих моделей і моделей зі зміщенням осі стінки засвідчило, що вони практично не відрізняються і, таким чином, зміщення осі в нормативних межах не впливає на критичні напруження втраги стійкості поясів (рис. 3). Це підтверджує, що стінка практично не сприймає нормальних напружень σ_w , які мають локальний характер в рівні її сполучення з поясами.

В якості фізико-математичної моделі другого типу була прийнята балка

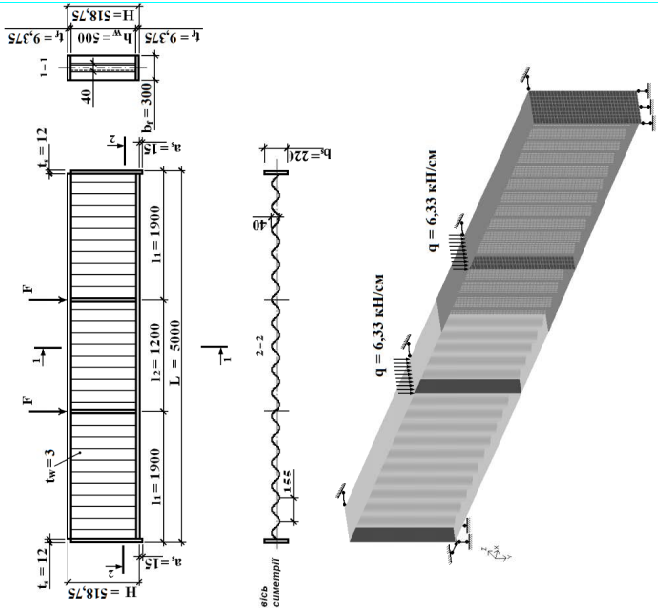


Рис. 4. Фізико-математична модель другого типу:

а – розрахункова схема; б – скінченноелементна модель

Як і в моделях першого типу, розглядалися варіанти зміщення осі стінки з поздовжньої осі балки на 2 і 5 мм та варіант з нулевим зміщенням осі. Гнучкість максимального звису поясу при зміщенні осі стінки на 5 мм становила $155/9,375 = 16,53$, що дещо перевищує нормативне значення для плоскої стінки:

$$b_{ef} / t_f = 0,5 \sqrt{E / R_y} = 0,5 \sqrt{2 \cdot 06 \cdot 10^5 / 240} = 0,5 \cdot 29,3 = 14,65. \quad (1)$$

Результати розрахунку моделі з різними значеннями ексцентриситетів в лінійній і нелінійній постановці наведені в табл. 1. Вони свідчать про значну залежність критичних напружень місцевої втрати поясів при дії на балку поперечних навантажень від значень ексцентриситетів зміщення осі стінки з поздовжньої осі балки.

Таблиця 1.

Результати розрахунку моделей з початковими недосконаlostями		Зміщення осі гофрованої стінки від проектної поздовжньої осі	
Вид розрахунку	e	e = 0 мм	e = 5 мм
		Коефіцієнт запасу стійкості	2,3485
		0,94	0,9

Результати розрахунків моделей із зміщенням осі гофрованої стінки від проектної поздовжньої осі балки за лінійною теорією виявили теоретичне збільшення амплітуди кривої втрати стійкості стиснутого поясу в місцях збільшення ширини його звусу (рис. 5). Загальний вигляд моделі після втрати стійкості за нелінійною теорією наведено на рис. 6.

В згинних елементах зміщення осі стінки з поздовжньої осі балки приводить до значного зменшення коефіцієнту критичних напружень поясів.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що геометрична недосконалість (зміщення осі) практично не впливає на критичні напруження поясів центрально- і позадцентровано-стиснутих елементів ПГС з невеликими відносними ексцентриситетами m , коли діюча поперечна сила є незначною. До таких елементів, в першу чергу, відносяться колони одноповерхових рамних конструкцій.





Рис. 6. Модель другого типу після втрати стійкості за нелінійною теорією

Висновки. У випадку значних поперечних сил зміщення осі стінки, а також вигини поздовжньої осі, можуть значною мірою впливати на несучу здатність елемента. Доведено, що в згинних елементах зміщення осі стінки з поздовжньої осі балки викликає значне зменшення коефіцієнту критичних напружень поясів. В той же час, при дії незначних поперечних сил зміщення осі практично не змінює несучу здатність поясів центрально— і позacentрово—стиснутих елементів ППС. Тому теоретичною основою для розрахунків елементів з такими недосконаlostями можуть стати нормативні вимоги по їх обмеженню, які на сьогодні відсутні. В наш час при виробництві таких конструкцій доцільно обмежувати недосконаlostі при виготовленні за технологічними вимогами проекту.

1. Нілова Т.О. Аналітичний метод розрахунку на місцеву стійкість поясів елементів з поперечно—гофрованими стінками // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М.Шимановського. Випуск 13. Видавництво «Сталь», Київ-2014; С. 68-75.
2. Нілова Т.О. Місцева стійкість поясів двогаврів з поперечно—гофрованою стінкою з урахуванням фізичної і геометричної нелінійності // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. Випуск 14. Видавництво «Сталь», Київ-2014; С. 59-69.
- Скутин В. И., Максимова О. В. Несовершенства холоднотянутых тонкостенных профилей // Легкие металлические конструкции. Межв. сб. науч. тр. — Свердловск, 1988. — С. 65 — 70.
4. Ершов В. И. Об устойчивости строительных конструкций // Металлические конструкции и испытание сооружений. Межв. сб. тр. № 1 (134). — Ленинград: ЛИСИ, 1977. — С. 31 — 35.
5. Якушев В. Л. Нелинейные деформации и устойчивость тонких оболочек. — М.: Наука, 2004 — 276 с. 6. ДБН В.2.6-163:2010 «Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу». Київ 2011. — 219 с. - Чинні з 01.12.2011 р.