

## Чисельне дослідження прогинів балок із перфорованою стінкою

Павло Русин, здобувач<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0008-1479-2244), Віталіна Юрченко, проф., д.т.н., професор<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-4513-809X)

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна

<sup>2</sup> Київський національний університет будівництва та архітектури, Україна

### АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є балка із перфорованою стінкою, в якій отвори у стінці мають форму правильного шестикутника. На основі комплексу експериментальних досліджень виявлено особливості напружено-деформованого стану балок із перфорованою стінкою та оцінено їх прогини. Виконано порівняльний аналіз прогинів, отриманих в результаті виконання числового експерименту, із прогинами балок, визначеними за методикою вітчизняних та закордонних норм проєктування. Встановлено, що при перевірних розрахунках балок із перфорованою стінкою за другою групою граничних станів похибка в оцінці прогинів однопрольотної шарнірно-обпертої балки, навантаженої рівномірно розподіленим поперечним навантаженням, в деяких випадках досягає 20%. Розроблені рекомендації щодо оцінки прогинів балок із перфорованою стінкою. Відповідно до пропонованих рекомендацій похибка при оцінці прогинів балок не перевищує 3%.

*Ключові слова:* балка з перфорованою стінкою, шестикутні отвори, прогини, скінченно-елементний аналіз, SOLIDWORKS.

### 1. ВСТУП

Балки із перфорованою стінкою розширюють область застосування гарячекатаних двотаврових профілів. Ефективність двотавра з перфорованою стінкою порівняно з вихідним двотавром пояснюється тим, що його висота приблизно у 1,4...1,5 разів більша, товщина стінки складає 1/75...1/95 від висоти. Двотаври з перфорованою стінкою забезпечують 20...30% економії металу порівняно з прокатними двотаврами та є дешевшими на 10...18%. За трудомісткістю виготовлення вони на 25...35% ефективніші, ніж зварні двотаври, за рахунок скорочення операцій обробки та обсягу зварювання. Ці позитивні якості балок із перфорованою стінкою роблять їх конкурентоздатними навіть порівняно з решічастими конструкціями. З огляду на це наукові дослідження з проблематики оцінки прогинів балок із перфорованою стінкою вбачаються актуальними.

### 2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Метою дослідження є виявлення особливостей напружено-деформованого стану балок із перфорованою стінкою із оцінкою їх прогинів при перевірних розрахунках за другою групою граничних станів. Для досягнення мети вирішувались такі задачі: виконати числовий експеримент із дослідження напружено-деформованого стану балок із перфорованою стінкою у великому діапазоні геометричних параметрів та розробити рекомендації по оцінці їх прогинів при перевірках за другою групою граничних станів.

### 3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розрахунковий поперечний переріз балки з перфорованою стінкою представляє собою два таври (верхнього і нижнього поясу балки), сумісна робота яких забезпечується наявними простінками між отворами. Таври верхнього і нижнього поясу балки, розташовані у межах отвору, працюють як на дію згинального моменту у балці,

що виникає під дією поперечного навантаження, так і на дію поперечних сил, які обумовлюють додатковий згин поясів. Граничний стан таврового пояса балки характеризується значним розвитком пластичних деформацій, які пронизують у кутах отворів практично увесь його поперечний переріз. Простінок балки працює головним чином на зсув, і його несуча здатність визначається місцевою стійкістю. У граничному стані місцеву стійкість також можуть втратити і елементи перерізу (стінка/полиця) стиснутого таврового пояса балки.

Оцінка прогинів елементів, що згинаються, на відповідність вимогам будівельних норм, виконується для розрахункових експлуатаційних навантажень, які є значно меншими за граничні розрахункові навантаження. З огляду на це, основна гіпотеза дослідження полягала у тому, що оцінка прогинів балок відбувається за умови роботи матеріалу балки в зоні пружних деформацій сталі.

### 4. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

На Рис.1 представлено скінченно-елементне моделювання балки із перфорованою стінкою у програмі SolidWorks Simulation 2023 (Dassault Systèmes S.A.) із використанням суцільних скінченних елементів з врахуванням фігурного спряження полиць зі стінкою балки.

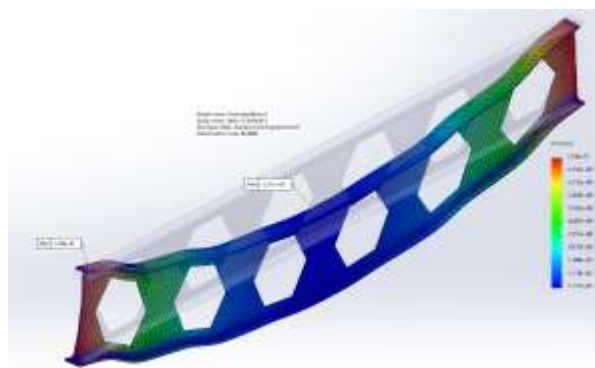


Рисунок 1. Скінченно-елементне моделювання балки.

Балку моделювали як шарнірно обперту та навантажену поперечним навантаженням, рівномірно-розподіленим по площині верхньої полиці. По верхній полиці балки також прикладались горизонтальні в'язі зсуву. Оцінювались прогини балки після виконання кроку статичного лінійного аналізу методом скінчених елементів (МСЕ) при лінійній роботі матеріалу балки (Табл. 1). При цьому розміри поперечного перерізу балок, які визначаються номером прокатного профілю та розмірами шестикутного отвору у стінці балки, приймалися за результатами вирішення задачі оптимізації таких балок, представленої у роботі [1].

### 5. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ

У нормах ДБН В.2.6-198:2014 [2] прогини балок із перфорованою стінкою на дію розрахункових навантажень другої групи граничних станів регламентується оцінювати з врахуванням коефіцієнту  $\mu = 0,95$ , який застосовується до моменту інерції перерізу балки нетто  $I_{x,\Sigma,net}$ . У такий спосіб враховується збільшення прогинів балок із перфорованою стінкою. Для випадку однопрольотної шарнірно-обпертої балки з перфорованою стінкою, навантаженої рівномірно-розподіленим навантаженням  $q_{SLS}$ , максимальний прогин у перерізі посередині прольоту балки обчислюється як:

$$f_{max} = \frac{5}{384} \frac{q_{SLS} L^4}{\mu EI_{x,\Sigma,net}} \quad (1)$$

У нормах EN 1993-1-13:2024 [3] максимальний прогин однопрольотної шарнірно-обпертої балки з перфорованою стінкою, навантаженої рівномірно-розподіленим навантаженням  $q_{SLS}$ , пропонується оцінювати як:

$$f_{max} = \frac{5}{384} \frac{q_{SLS} L^4}{EI_x} \left( 1 + 10n_0 \frac{3a^3 \sqrt{3}}{hL^2} \right), \quad (2)$$

де  $n_0$  – кількість отворів у стінці балки по довжині її прольоту;  $I_x$  – момент інерції поперечного перерізу балки, обчислений як для балки із суцільною стінкою.

Таблиця 1: Прогини балок із перфорованою стінкою

L/h	q <sub>SLS</sub> , кН/м	Номер профіля	Прогин, мм				
			МСЕ	за (1)	Δ, %	за (2)	Δ, %
12,18	58,82	70Б2	29,03	27,194	-6,75	27,85	-4,24
10,80	77,21	80Б1	28,48	26,308	-8,26	27,139	-4,94
9,57	95,59	90Б1	23,89	21,29	-12,23	22,348	-6,90
8,59	150,74	100Б2	23,61	19,872	-18,81	21,256	-11,07
8,61	172,79	100Б3	24,09	20,405	-18,06	21,697	-11,03
8,63	176,47	100Б3	24,62	20,93	-17,63	22,623	-8,83
8,54	183,82	100Б4	23,18	19,389	-19,55	20,711	-11,92
8,55	187,5	100Б4	23,57	19,839	-18,81	21,151	-11,44
8,58	191,18	100Б4	24,05	20,316	-18,38	21,603	-11,33

У Табл. 1 та на Рис. 2 представлено порівняльний аналіз прогинів балок прольотом 12 м, отриманих в результаті реалізації числового експерименту, з прогинами, визначеними за рекомендаціями норм. Такий аналіз дозволив виявити межі застосування спрощеної методики оцінки прогинів балок із перфорованої стінкою, яка представлена в ДБН В.2.6-198:2014 та EN 1993-1-13:2024.

Виконані числові дослідження засвідчили, що у випадку перевірного розрахунку балки з перфорованою стінкою за

другою групою граничних станів відповідно до ДБН В.2.6-198:2014 похибка  $\Delta$  в оцінці прогинів однопрольотної шарнірно-обпертої балки, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням, сягає 20% (для коротких балок при відношенні прольоту балки до загальної висоти її поперечного перерізу  $L/h < 9$ ).

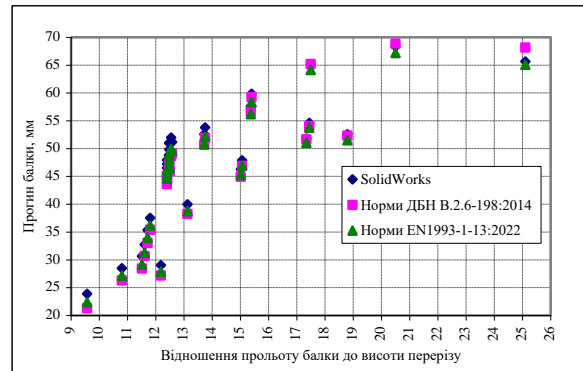


Рисунок 2. Графік прогину балки залежно від L/h.

Для точнішої оцінки прогинів балок із перфорованою стінкою при виконанні перевірного розрахунку за другою групою граничних станів відповідно до ДБН В.2.6-198:2014 пропонується коефіцієнт  $\mu$  обчислювати як:

$$\mu = 0,00009 \left( \frac{L}{h} \right)^3 - 0,0051 \left( \frac{L}{h} \right)^2 + 0,1032 \left( \frac{L}{h} \right) + 0,2407. \quad (3)$$

У такому випадку похибка при оцінці прогинів балок не перевищуватиме 3% для широкого діапазону відношення прольоту балки до загальної висоти поперечного перерізу балки  $8,5 < L/h < 25$ .

### 6. ВИСНОВКИ

Розроблені рекомендації щодо оцінки збільшених прогинів балок із перфорованою стінкою за рахунок наявних у стінці отворів. Дані рекомендації базуються на використанні поліноміальної залежності для понижувального коефіцієнту, який коригує жорсткість балки із перфорованою стінкою при оцінці її прогинів. При застосуванні запропонованого понижувального коефіцієнту похибка при оцінці прогинів балок не перевищує 3% для широкого діапазону відношення прольоту балки до загальної висоти її перерізу  $8,5 < L/h < 25$ .

#### Список літератури

[1] Yurchenko, V., Peleshko, I., & Rusyn, P. (2024). Optimization of cross-sectional dimensions of castellated beams with hexagonal openings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (7) (129), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304803>

[2] ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ, Мінрегіонбуд України, 2014.

[3] EN 1993-1-13:2022 2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-13: Rules for beams with large web openings. European committee for standardization, Brussels. 2022.