

Дослідження нагрівання сталеві балки з гофрованою стінкою в умовах пожежі

Людмила Лавріненко¹, Валерія Некора²

^{1,2} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037
¹ludmila.lavrinenko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5601-0943>
²valerianekora@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4354-4422>

DOI: 10.32347/2522-4182.6.2020.12-21

Анотація. В розвиток досліджень складених балок з хвилястими стінками виконано дослідження поведінки таких балок за дії підвищених температур в умовах пожежі. Розглядаються нормативні вимоги до проектування гофрованих балок з урахуванням умов норм проектування. Розрахунок вогнестійкості, що вимагається нормами проектуванні Єврокод 3, стосується, насамперед, балок з плоскими стінками. В той час, як дослідження механічної поведінки балок з хвилястими стінками відносно широкі, конкретні методики стосовно механічної поведінки цих балок за умов високих температур недостатні.

Наводиться аналіз деяких натурних досліджень, які підтверджують розбіжність експериментальних результатів та тих, що отримані за нормами проектування балок з плоскими стінками.

В роботі проведено аналіз параметрів нагріву сталевих балок з гофрованими стінками з урахуванням їх конструктивних особливостей та виконано порівняння з аналогічними параметрами балки з плоскою стінкою.

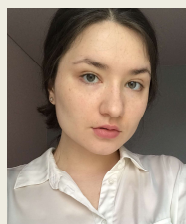
Відмічається необхідність проведення досліджень з використанням нестационарного диференціального рівняння теплопровідності для удосконалення математичної моделі.

Робота виконана з метою визначення закономірностей зміни параметрів нагріву сталевих балок з гофрованою стінкою в умовах пожежі як наукового підґрунтя для розрахункової оцінки їх вогнестійкості.

Ключові слова: вогнестійкість, сталеві балки, гофрована стінка, параметри нагріву



Людмила Лавріненко
доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій
к.т.н., доцент



Валерія Некора
магістр кафедри металевих та дерев'яних конструкцій

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сучасному етапі будівництва активно йде пошук нових моделей житлових і громадських будинків, які б дозволяли суттєво зменшити терміни будівництва, спростити технологічні процеси, обмежити вартість будівель і при цьому покращити їх експлуатаційні якості. Успішний досвід та поширення застосування двотаврів з тонкими стінками у практиці легких металевих конструкцій вимагає подальшого обговорення та вдосконалення цього прогресивного виду несучих конструкцій [1,2].

Одним з таких типів конструкцій є гофровані двотаврові сталеві SIN-балки, в яких стінка профільована у вигляді синусоїди. SIN-балка рентабельна при застосуванні як на середніх, так і на великих прольотах - її довжина завжди відповідає даним індивідуального замовлення, прольоти можуть бути довжиною до 80 м.

Гофробалки можуть бути використані як прогони, ригелі, колони для каркасів [3,4,6]. SIN-балки мають максимальну несучу здатність при оптимальній власній вазі і висоті. Профільована стінка балки має більшу жорсткість і забезпечує вищу стійкість, ніж плоска стінка двотавра за такої ж товщини, дозволяє обходитися без додаткових ребер жорсткості та, в свою чергу, зменшити металоємність будівельних конструкцій.

Подальші дослідження дають можливість створення таких конструктивних форм, де гофровані елементи існуючої номенклатури застосовуються не тільки в якості балок, а й в рамних та комбінованих системах [4,5].

Розширення області застосування гофробалок вбачається у подальшому уточненні розрахункового апарату елементів з поперечним гофруванням тонкої стінки як для пошуку резервів несучої здатності, і в забезпеченні необхідної надійності роботи в екстремальних умовах експлуатації. За умов пожежі проектування має виконуватися у відповідності до Єврокод 3 (ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 «Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2 Розрахунок конструкцій на вогнестійкість»). Нормами передбачається, що сталеві конструкції мають бути спроектовані таким чином, щоб в разі пожежі вони були здатні задовольняти такі вимоги:

- зберігати протягом певного часу стійкість та несучу здатність;
- створювати обмеження на шляху поширення пожежі всередині будівлі;
- створювати обмеження перекидання пожежі на сусідні будівлі;
- забезпечувати можливість для людей покинути небезпечну зону;
- забезпечувати безпечну роботу пожежників.

Далі буде розглядатися перша з наведених задач. З таких позицій уточнення несучої здатності балок з гофрованими стінками в умовах високотемпературного нагріву під час пожежі є актуальною науковою задачею. Відомо, що витрати на вогнезахист становлять близько 2% вартості бу-

дівництва, тому ця задача набуває додатково і економічної ваги.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В чинних нормах проектування ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування» докладно розглянуті конструктивні особливості балок з синусоїдно гофрованою стінкою. Досліджується їх пружна та пружно-пластична поведінка в умовах навантаження [18]. В чинних нормативних документах описано основні положення проектного розрахунку таких балок, проте не міститься рекомендацій щодо розрахункової оцінки їх вогнестійкості. Поряд із тим існують роботи [7], присвячені дослідженням балок з гофрованою стінкою на вогнестійкість з конструктивним вогнезахистом у вигляді вогнезахисного облицювання за ДБН В.1.1-7 : 2016 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва».

Але в даних роботах застосовуються підходи, що не мають посилання на імплементовані в Україні методи розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 «Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2 Розрахунок конструкцій на вогнестійкість» та Єврокод 1 ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 «Дії на конструкції . Частина 1-2 . Дії на конструкції під час пожежі».

Вказані норми проектування наводять методику врахування стандартного впливу на балку з плоскою стінкою, проте в разі гофрованої стінки розрахункова ситуація може змінитися. В даних роботах також не приділено уваги порівняльному аналізу поведінки сталевих балок з плоскою стінкою та сталевих балок із гофрованою стінкою в умовах високотемпературного нагрівання при пожежі.

Відомі деякі експерименти, серед яких великомасштабний експеримент в Morkro в Чехії [19,21]. В експерименті була реалізована пожежа в будівлі з різними типами елементів, в тому числі 2 балки з гофрованими стінками. Стосовно саме цих балок експеримент засвідчив помітну незбіжність

результатів, з тими, що передбачалися розрахунком за нормами [21]. Отримані експериментально температури були вищими за теоретичні, а їх розподіл по перерізу балки також відрізнявся від теоретичного та був нерівномірним. Було також висунуто припущення про вплив гнучкості на нерівномірність розподілу. Модель не надала влучних прогнозів стосовно температур полиць, які зростали повільніше, ніж температура стінки.

Основний аналітичний висновок експерименту полягав у тому, що основна незбіжність між теоретичними та експериментальними результатами полягала у відмінності між реальними та теоретичними кривими температурного нагріву залежно від часу.

Теоретична модель за EN 1993-1-2 розглядає зміни механічних властивостей сталі при зміні температури. Головна мета моделі – передбачити відмову балки шляхом порівняння зміни її опору під дією температури та діючого навантаження. Ця модель стосується елемента в умовах рівномірного розподілу температури по перерізу.

Статичний розрахунок балок виконується за формулами, наведеними в ДБН В.2.6-198 та EN 1993-1-5, Додаток D [8,9]. Основна мета розрахунку полягає в обчисленні опору при згині та зсуві балки за температури середовища експлуатації, а потім за допомогою коефіцієнтів редукції за EN 1993-1-2 визначення опору при різних температурах (20°C, 100°C, 200°C ... до 1200°C). Методика та значення коефіцієнтів редукції розроблені стосовно балок з плоскими стінками [17] і не уточнюються стосовно більш складних конфігурацій.

При дослідженні роботи балки з гофрованою стінкою серед усіх аспектів найскладнішим є термічний. Механічна поведінка описана досить повно завдяки таким дослідженням, як [10, 11, 12, 13, 14], проте відсутня методика, що описує механічну поведінку в умовах високотемпературного нагріву. З метою підвищення вогнестійкості пропонується збільшення товщини стінки, не пов'язане із забезпеченням несучої здатності [15, 16].

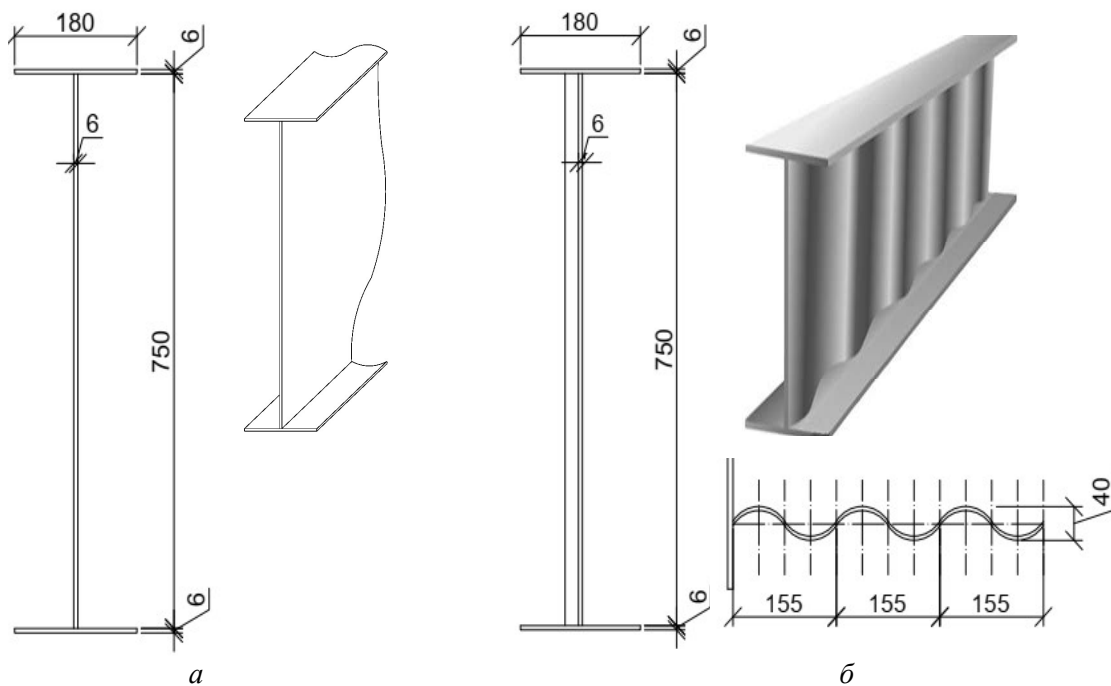


Рис.1. Конструктивні параметри балки: *a* – складений двотавр з плоскою стінкою; *б* – складений двотавр з гофрованою стінкою

Fig.1. Design parameters: *a* - with a flat wyi; *b* - with corrugated wyi

З огляду на викладене можна зазначити, що досі залишаються відкритими питання поведінки балок з гофрованою стінкою під час пожежі та зміна її механічних характеристик та несучої здатності за умов теплового впливу пожежі. У зв'язку з цим сформульована мета дослідження.

Мета роботи. Мета роботи полягає у визначенні закономірностей зміни параметрів нагріву сталевих балок з гофрованою стінкою в умовах пожежі як наукове підґрунтя щодо розрахункової оцінки їх вогнестійкості.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Першою частиною розрахунку будь-якої конструкції на вогнестійкість є визначення температур нагрівання даної конструкції. Для вивчення нагрівання сталеві балки з гофрованою стінкою в умовах пожежі окрім неї було розглянуто балку з плоскою стінкою (складений двотавр). За таких умов дані балки мають однакові габаритні розміри у припущенні, що балка із гофрованою стінкою за таких умов має стінку, що забезпечує таку ж місцеву стійкість.

На рис. 1 показані конструктивні параметри балки з плоскою стінкою (складений двотавр) та досліджуваної балки з гофрованою стінкою. Геометричні параметри досліджуваних балок наведені у табл. 1.

У даній роботі як припущення прийнято, що досліджувані балки є частиною суцільного каркасу і жорстко закріплені в опорах. Розрахункова схема балки із граничними умовами закріплення та довжиною прольоту наведена на рис. 2.

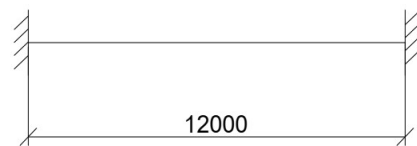


Рис.2. Розрахункова схема досліджуваних балок

Fig.2. The design scheme of the studied beams

Для визначення температури нагріву сталеві балки може бути використана методика, що має у своїй основі формулу для обчислення підвищення температури $\Delta\theta_{a,t}$ на кожному часовому кроці Δt :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{Vc_a\rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \Delta t \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0), \quad (1)$$

Табл. 1. Основні параметри двотаврової балки з плоскою стінкою

Table 1. The basic parameters of the I-beam with a flat web

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри перерізів сталевих балок першого типу (див. рис. 1, а)			
• ширина перерізу	b	0.1	м
• товщина полки	t_f	0.006	
• висота перерізу	h	0.75	
• товщина стінки	t_w	0.005	
Геометричні розміри перерізу сталеві балки другого типу (див. рис. 1, б)			
• ширина перерізу	b	0.1	м
• товщина полки	t_f	0.006	
• висота перерізу	h	0.75	
• товщина стінки	t_w	0.003	
• розгорнута довжина півхвилі	s	0.09	
гофру	m	0.155	
• довжина хвилі	f	0.04	
• висота хвилі			
Сталь		S245	
Густина сталі	ρ_a	7850	кг/м ³

тут k_{sh} – поправочний коефіцієнт для врахування впливу тіньового ефекту;

A_m/V – коефіцієнт перерізу для незахищених сталених конструкцій (m^{-1});

A_m – площа поверхні конструкції, що обігривається, на одиницю довжини (m^2/m);

V – об’єм конструкції на одиницю довжини (m^3/m);

c_a – питома теплоємність сталі, (Дж/(кг·°C));

\dot{h}_{net} – рахункове значення результуючого питомого теплового потоку на одиницю площі ($Вт/м^2$);

Δt – проміжок часу (с);

ρ_a – густина сталі, (кг/м³).

Питомий тепловий потік обчислювався за виразом [3, 4]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}, \quad (2)$$

де $\dot{h}_{net,c}$ – загальний конвективний питомий тепловий потік, ($Вт/м^2$);

$\dot{h}_{net,r}$ – загальний променистий тепловий потік, ($Вт/м^2$).

Конвективний тепловий потік обчислюється за виразом:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c(\theta_p - \theta_m), \quad (3)$$

де $\alpha_c = 25$ – конвективний коефіцієнт тепловіддачі, $Вт \cdot м^{-2} \cdot C^{-1}$;

θ_p – температура поблизу балки при пожежі, C;

θ_m – температура матеріалу балки, °C.

Питомий променистий тепловий потік визначається за вираженням:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma ((\theta_p + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4) \quad (4)$$

де $\Phi = 1$ – кутовий коефіцієнт опромінення;

$\varepsilon_m = 0.8$ – ступінь чорноти поверхні конструкції;

$\varepsilon_f = 1$ – ступінь чорноти полум’я пожежі;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{°C}^{-4}$ – стала Стефана – Больцмана.

Згідно із вимогами ДСТУ-Н EN 1991-1-2 та ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 для розрахунку можна використати стандартний температурний режим пожежі, який описується формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t / 60 + 1) + \theta_0, \quad (5)$$

де: t – час впливу пожежі, с;

θ_0 – початкова температура середовища, °C; $\theta_0 = 20$ °C;

$\theta_p(t)$ – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій в залежності від часу τ стандартного випробування.

Для обчислень із використанням формули (1) для визначення температури нагрівання сталеві балки під час пожежі було використано систему імплікаційних виразів, що описують температурні залежності теплофізичних характеристик сталі згідно із рекомендаціями стандарту ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2, які наведені у табл. 2.

Табл. 2. Теплофізичні характеристики сталі
Table 2. Thermophysical characteristics of steel

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, $Вт/(м \cdot °C)$	Об’ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$, $Дж/(м^3 \cdot °C)$		Густина, $кг/м^3$
54 – 3,33·10 ⁻² θ при 20 °C ≤ θ ≤ 800°C, 27,3 при θ > 800 °C.	425+0,773θ - 1,69 10 ⁻² θ ² +2,22 10 ⁻⁶ θ ³	при 20 °C ≤ θ ≤ 600 °C,	7850
	666–13002/(θ-738)	при 600°C < θ ≤ 735°C,	
	545+17820/(θ-731)	при 735°C < θ ≤ 900°C,	
	650	при 900°C < θ ≤ 1200°C	

Табл. 3. Коефіцієнти перерізів досліджуваних балок
Table 3. Cross-section coefficients of the studied beams

Коефіцієнт перерізу A_m/V , m^{-1}	
Балка з плоскою стінкою 366.397	Балка з гофрованою стінкою 666.479

При визначенні коефіцієнту перерізу A_m/V для обох типів балок була прийнята типова для них схема трьохстороннього обігріву, яка показана на рис. 3.

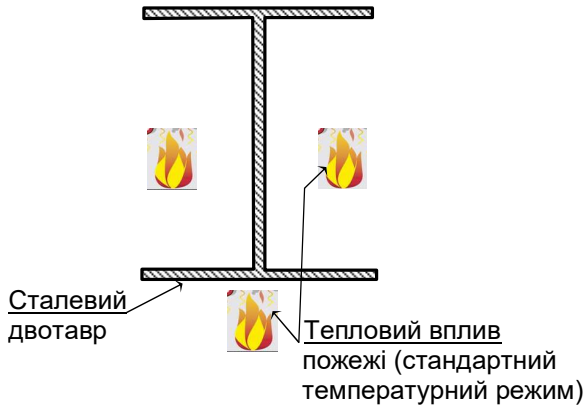


Рис. 3. Схема теплового впливу пожежі на досліджувані сталеві балки.
Fig. 3. The scheme of thermal impact of fire on the studied steel beams

Оскільки площа та конфігурація перерізу двотаврової сталевий балки з плоскою стінкою є незмінною по довжині, її коефіцієнт перерізу визначається за формулою:

$$A_m/V = P/A_s, \quad (6)$$

де $P = 3b + 2h - 2t_w$ – сумарна довжина контурних ліній перерізу, які відчувають тепловий вплив, м;

$A_s = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w$ – площа поперечного двотаврового перерізу, m^2 .

Коефіцієнт перерізу балки з гофрованою стінкою не може бути обчислений у такий спосіб, оскільки конфігурація її перерізу є змінною по її довжині, тож коефіцієнт перерізу визначається через такі вирази:

$$A_m = (3b - 2t_w)L + (h - 2t_f)S; \quad V = 2bt_fL + (h - 2t_f)St_w, \quad (7)$$

де $S = 2Ls/m$ – довжина синусоїди контуру гофрованої стінки, м.

Провівши необхідні обчислення, були визначені коефіцієнти перерізів досліджу-

ваних балок, які наведені у табл. 3 Дані табл. 3 показують, що коефіцієнт перерізу гофробалки майже вдвічі більше за коефіцієнт перерізу звичайної двотаврової балки, яка вибрана для порівняння. Це пояснюється тим, що площа обігрівної поверхні балки суттєво збільшується за рахунок збільшення бокових поверхонь стінок, а об'єм балки суттєво зменшується при зменшенні товщини стінки. Враховуючи вираз для визначення температури балки під температурним впливом пожежі, можна припустити, що гофробалка має нагріватися швидше за балку зі звичайним двотавровим перерізом.

У результаті розрахунків були отримані дані щодо режимів прогріву досліджуваних балок.

На рис. 4 наведено графіки зміни температури нагрівання досліджуваних сталевих балок у залежності від часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Аналіз графіків на рис. 4 показав, що режими нагрівання досліджуваних сталевих балок практично відрізняються мало. З метою більш точного аналізу різниці температур нагрівання балок з використанням формули (1) були визначені визначені температури для моментів часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, які відповідають ряду стандартних класів вогнестійкості 15 хв, 30 хв, 45 хв, 60 хв згідно з ДБН В.1.1-7 «Захист від пожежі». Отримані значення температури наведені у табл. 4.

Дані табл. 4 підтверджують те, що, не дивлячись на велику різницю між коефіцієнтами перерізу досліджуваних балок, режим нагрівання балки із гофрованою стінкою в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі мало відрізняється від режиму нагрівання сталевий балки з плоскою стінкою такої оскільки різниця між температурами в однакові моменти часу розвитку пожежі складає не більше ніж $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

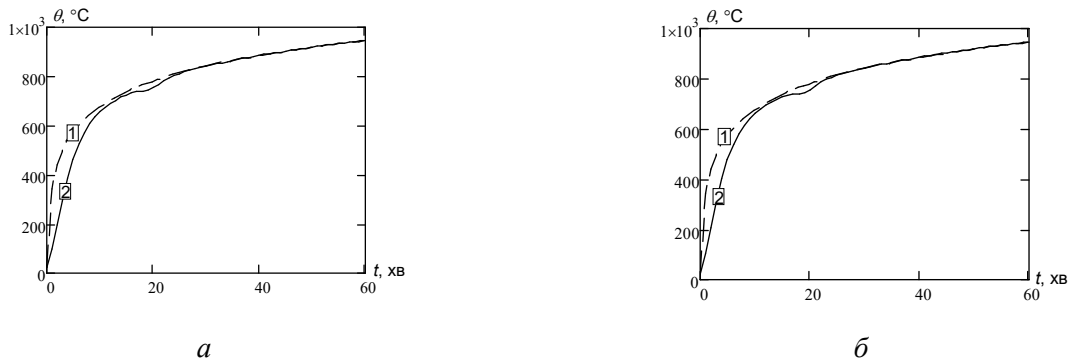


Рис. 4. Графіки залежності температури нагріву сталевих балок від часу (2) за умов теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі (1): *a* – балка з плоскою стінкою; *б* – сталева балка з гофрованою стінкою

Fig. 4. Graphs of the temperature of heating of steel beams against time (2) under conditions thermal effect of the standard temperature of fire (1): *a* - beam with flat web; *b* - steel beam with corrugated web

Табл.4. Температури нагріву балок в стандартних інтервалах часу

Табл.4. Heating temperatures of beams at standard time intervals

Температурні криві	Температури нагріву балки в періоди часу за стандартними класами вогнестійкості, хв			
	15	30	45	60
Температура стандартної кривої пожежі, °C	20	738.561	841.796	902.34
Температура нагріву балки з плоскою стінкою, °C	20	724.186	841.24	902.32
Температура нагріву балки з гофрованою стінкою, °C	20	725.658	841.688	902.33

Такий результат може бути пояснений великою теплопровідністю сталі.

Слід зазначити, що припущення про нагрівання балок, які прогріваються однаково по всьому перерізу, насправді є наближенням, зумовленим більш жорсткі умови теплового впливу пожежі. Крім цього синусоїдальна форма стінки також впливає на умови теплообміну конвекцією та випромінюванням. Про це свідчать результати досліджень, наведені у роботах [19, 20]. Таким чином, враховуючи викладене та результати, наведені у роботі [21], мають бути проведені більш точні розрахунки з використанням нестационарного диференціального рівняння теплопровідності, що дало б змогу удосконалити математичну модель, наведену у EN 1993-1-2 для розрахунку балок з гофрованими стінками.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

З огляду на проведені дослідження були отримані результати, які дозволяють зробити такі висновки.

1. При дослідженні роботи балки з гофрованою стінкою серед усіх аспектів найскладнішим є термічний. Механічна поведінка описана значно повніше завдяки таким дослідженням, як [12-16], проте відсутня методика, що пов'язує механічну поведінку таких балок з умовами високо-температурного нагріву.

2. Для дослідження режимів трьохстороннього нагріву сталеві двотаврові балки з плоскою стінкою та сталеві SIN-балки були проведені розрахунки за методикою згідно із рекомендаціями Єврокоду 3 з відкоригованими значеннями коефіцієнтів перерізу для балок з гофрованими стінками, а отримані результати порівняні між собою.

3. Розрахунки температурних режимів прогрівання за EN 1993-1-2 не виявили принципових відмінностей для балок різних типів, вони є практично однаковими,

оскільки відрізняються не більше як на 2.5 °С.

4. З огляду на складність геометричної конфігурації гофробалок та особливості теплообміну таких балок в умовах пожежі його дослідження має бути проведено з використанням нестационарного диференціального рівняння теплопровідності, що дало б змогу удосконалити математичну модель для розрахунку балок з гофрованими стінками.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Лаврінченко Л.І.** (2012) Застосування ефективних двотаврових елементів з тонкими поперечно-гофрованими стінками. *Проблеми державного будівництва в Україні*. Вип.20. В 2-х томах, т.1 (240 с.). ХУП науково-практична конференція «Україна в євроінтеграційних процесах». Київ: КиМУ, 2012. – С. 223–226.
2. **Нілов О.О., Нілова Т.О.** (2013) Металеві конструкції. Балки. Колони: Навчальний посібник – К.: Логос, 2013. – 240 с.
3. **Пічугін С.Ф., Чичулін В.П., К.В. Чичуліна Б.В., Федоров** (2011). Економічна доцільність використання нових типів легких балок із профільованою стінкою. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) – Вип. 2(30). – 2011. – С. 149-154.*
4. **Dr. S. Raviraj.** (2009) Design Of Beams With Corrugated Web [Проектування балок з хвилястою стінкою]. Construction Industry Reference Magazine Built Constructions, available at <http://www.builtconstructions.in/OnlineMagazine/Bangalore/Pages/Design-Of-Beams-With-Corrugated-Web-310.aspx> (accessed July 2013)
5. **Лаврінченко Л.І., Скупова А.В.** (2013) Кроквяна малоелементна шпренгельна система з оптимальними геометричними параметрами. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Вип.27. Рівне: 2013. – С. 127–134.
6. **Лаврінченко Л.І., Гетун Г.В., Нілова Т.О.** (2019). Застосування балок з гофрованими стінками при реконструкції та підсиленні перекриттів. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд, III Міжнародна науково-практична конференція, Одеська державна академія будівництва та архітектури*, 26-28 вересня 2019. Тези доповідей. – с.92.
7. **Ilyin N., Panfilov D., Lukin A.** (2017) Constructive fire protection of steel corrugated beams of buildings and other structures [Конструктивний протипожежний захист сталевих гофрованих балок будівель та інших конструкцій]. *MATEC Web of Conferences* 106, 02014, 2017, DOI: 10.1051/mateconf/20171060 SPbWOSCE-2016 2014, available at https://www.researchgate.net/publication/317115008_Constructive_fire_protection_of_steel_corrugated_beams_of_buildings_and_other_structures (accessed 2016).
8. **Johansson B., Maquoi R., Seldasek G., Muller C., Beg D.** (2007). Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated Structural Elements [Коментарі та робочі приклади до EN 1993-1-5. Конструктивні елементи з листів]. *JRS Scientific and Technical Reports*. – p.152–167.
9. **Pasternak H., Kubieniec G.** (2010) Plate girders with corrugated webs [Складені балки з хвилястою стінкою]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(2), pp.166-171.
10. **Siokola, W.** (1997). Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profiliertem [Гофровані складені балки. Виробництво та застосування]. *Steg, Stahlbau* 66, pp. 595–605.
11. **Biancolini, M.E., Brutti, C. and Porziani, S.** (2009), Analysis of corrugated board panels under compression load [Аналіз профільованих настилів при стискувальному навантаженні]. *Steel. Compos. Struct.*, 9(1), pp. 1-17.
12. **Chan, C.L., Khalid, Y.A., Sahari, B.B. and Hamouda, A.M.S.** (2002), Finite element analysis of corrugated web beams under bending [Кінцево-елементний аналіз хвилястих стінок балок при згині]. *J. Constr. Steel. Res.*, 58, pp. 1391-1406.
13. **Driver, R.G., Abbas, H.H. and Sause, R.** (2006), Shear behavior of corrugated web bridge girder [Поведінка гофрованих мастових балок при зсуві]. *J. Struct. Eng. ASCE*, 132(2), pp. 195-203.
14. **Bilyk S.I., Nilova T.O., Semchuk I.Y., Lavrinenko L.I.** (2019). Experimental and Theoretical Investigation of Inserted Floors with Decreased Height [Експериментальне та теоретичне дослідження перекриттів пониженої висоти] *Varilna Tehnika, Vol.69, 2019-1*, pp. 7 – 15.
15. **Pasternak, H., Robra, J., Bachmann, V.** (2008). Corrugated web beams with increased

web thickness [Хвилясті стінки із збільшеною товщиною], in *Proceedings 5th Europea Conference on Steel and Composite Structures, Graz, Austria* . – pp. 1161–1166.

16. **Pasternak H., Robra J., Kubieniec G.** (2010). New proposals for EN 1993-1-5, Annex D: Plate girders with corrugated webs [Нові пропозиції до EN 1993-1-5. Додаток D. Складення балки з хвилястими стінками]. — *Proceedings of Joint IABSE-fib Conference on Codes in Structural Engineering. Developments and Needs for International Practice, Dubrovnik, May 3-5, pp. 3–5 Google Scholar*.
 17. **Yin Y.Z., Wang Y.C.** (2004). A numerical study of large deflection behaviour of restrained steel beams at elevated temperatures [Чисельне дослідження сталевих балок при підвищеній температурі]. *Journal of Constructional Steel Research*, No. 60, pp. 1029 – 1047.
 18. **Лавріненко Л.І., Нілов О.О., Нілова Т.О.** (2016) Місцева стійкість елементів перерізу сталевих балок з поперечно гофрованими стінками в області пружно-пластичної роботи. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. Випуск 18 – К., Сталь*. – 2016. – с.33-50.
 19. **Kallerová P., Wald F.** (2008), Fire Test on Experimental Structure in Mokrsko, in Czech: Požární zkouška na experimentálním objektu v Mokrsku [Вогневі дослідження натурної конструкції в Мокрско, Чехія], *CTU in Prague*, August 2008.
 20. **Wald F., Kallerová P., Chlouba j., Sokol Z.**, (2010), Fire test on an administrative building in Mokrsko [Вогневі дослідження на адміністративній будівлі в Мокрско]. *Czech Technical University in Prague*. Prague, May 2010.
 21. **Jana T., Wald F., Kyzlik P.** (2010), Beams with corrugated web at elevated temperatures in fire [Балки з гофрованими стінками за дії підвищеної температури при пожежі]. *Centre for Integrated Design of Advanced Structures*, – 2010
1. **Lavrinenko L.I.** Zastocuvann`ia efektyvnyh dvotavrovyyh elementyv z tonkimi poperechno-gofrovanymi stynkami [Application of effective I-elements with thin cross-corrugated webs]. *Problemi derzhavnogo budivnytstva v Ukraini. Vip. 20, v.1. XVII naukovo-praktichna konferentsiia «Ukraina v evrointegratsiynikh protsesakh»*. Kyiv: KiMU, 2012. pp. 223–226 (in Ukrainian).
 2. **Nilov O.O., Nilova T.O.** (2013) *Metalevi konstruktsii. Balky. Kolony: Navchalnyi posibnyk [Metal structures. Beams. Columns] – K.: Lohos, 2013. – 240 p.* (in Ukrainian).
 3. **Pichuhin S.F., Chychulin V.P., K.V. Chychulina B.V., Fedorov** (2011). Ekonomichna dotsilnist vykorystannia novykh typiv lehkykh balok iz profilovanoiu stinkoiu [Economic feasibility of using beams with a profiled web]. *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) – Vip. 2(30).* – 2011. – pp. 149-154 (in Ukrainian).
 4. **Dr. S. Raviraj.** (2009) Design Of Beams With Corrugated. *Construction Industry Reference Magazine Built Constructions*, available at <http://www.builtconstructions.in/OnlineMagazine/Bangalore/Pages/Design-Of-Beams-With-Corrugated-Web-310.aspx> (accessed July 2013).
 5. **Lavrinenko L.I., Skupova A.V.** Krovkivana maloelementna shprengel'na sistema z optimal'nimi geometrichnimi parametrami [Roof low-element composite system with optimum geometrical parameters]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii budivli ta sporudi. Vip.27. Rivne: 2013.* pp. 127–134 (in Ukrainian).
 6. **Lavrinenko L.I., Hetun H.V., Nilova T.O.** (2019). Zastosuvannia balok z hofrovanymy stinkamy pry rekonstruktsii ta pidsylenni perekryttiv [Application of beams with corrugated webs during reconstruction and reinforcement of overlappings.]. *Ekspluatatsiia ta rekonstruktsiia budivel i sporud, III Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, Odeska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury*, 26-28 veresnia 2019. – p. 92 (in Ukrainian)
 7. **Ilyin N., Panfilov D., Lukin A.** (2017) Constructive fire protection of steel corrugated beams of buildings and other structures. *MATEC Web of Conferences 106, 02014, 2017*, DOI: 10.1051 /mateconf/20171060 SPbWOSCE-2016 2014, at https://www.researchgate.net/publication/317115008_Constructive_fire_protection_of_steel_corrugated_beams_of_buildings_and_other_structures (accessed 2016)
 8. **Johansson B., Maquoi R., Seldasek G., Muller C., Beg D.** (2007). Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated

REFERENCES

1. **Lavrinenko L.I.** Zastocuvann`ia efektyvnyh dvotavrovyyh elementyv z tonkimi poperechno-gofrovanymi stynkami [Application of effective I-elements with thin cross-corrugated webs]. *Problemi derzhavnogo budivnytstva v Ukraini. Vip. 20, v.1. XVII naukovo-praktichna konferentsiia «Ukraina v evrointegratsiynikh*

- Structural Elements. *JRS Scientific and Technical Reports*. – p.152–167.
9. **Pasternak H., Kubieniec G.** (2010) Plate girders with corrugated webs. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(2), pp.166-171
 10. **Siokola, W.** (1997). Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profiliertem Steg, *Stahlbau* 66, pp.595–605.
 11. **Biancolini, M.E., Brutti, C. and Porziani, S.** (2009), Analysis of corrugated board panels under compression load, *Steel. Compos. Struct.*, 9(1), pp. 1-17.
 12. **Chan, C.L., Khalid, Y.A., Sahari, B.B. and Hamouda, A.M.S.** (2002), Finite element analysis of corrugated web beams under bending, *J. Constr. Steel. Res.*, 58, pp. 1391-1406.
 13. **Driver, R.G., Abbas, H.H. and Sause, R.** (2006), Shear behavior of corrugated web bridge girder, *J. Struct. Eng. ASCE*, 132(2), pp. 195-203.
 14. **Bilyk S.I., Nilova T.O., Semchuk I.Y., Lavrinenko L.I.** (2019). Experimental and Theoretical Investigation of Inserted Floors with Decreased Height, *Varilna Tehnika, Vol.69, 2019-1*, pp. 7 – 15.
 15. **Pasternak, H., Robra, J., Bachmann, V.** (2008). Corrugated web beams with increased web thickness, in *Proceedings 5th Europea Conference on Steel and Composite Structures, Graz, Austria*, pp. 1161–1166.
 16. **Pasternak H., Robra J., Kubieniec G.** (2010). New proposals for EN 1993-1-5, Annex D: Plate girders with corrugated webs. — *Proceedings of Joint IABSE-fib Conference on Codes in Structural Engineering. Developments and Needs for International Practice, Dubrovnik, May 3-5*, pp. 3–5 [Google Scholar](#)
 17. **Yin Y.Z., Wang Y.C.** (2004). A numerical study of large deflection behaviour of restrained steel beams at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, No. 60, pp. 1029 – 1047.
 18. **Lavrinenko L.I., Nilov O.O., Nilova T.O.** (2016) Mistseva stiiikist elementiv pererizu stalevykh balok z poperechno hofrovanymy stinkamy v oblasti pruzhno-plastychnoi roboty [Local stability of cross-section elements of steel beams with cross-corrugated webs in the field of elastic-plastic work]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho instytutu stalevykh konstruktsii im. V.M. Shymanovskoho*. Vip. 18 – K., Stal. – 2016. – p.33-50 (in Ukrainian)
 19. **Kallerová P., Wald F.** (2008), Fire Test on Experimental Structure in Mokrsko, in Czech: Požární zkouška na experimentálním objektu v Mokrsku, *CTU in Prague*, August 2008, ISBN 978-80-01-04146-8.
 20. **Wald F., Kallerová P., Chlouba j., Sokol Z.**, (2010), Fire test on an administrative building in Mokrsko. *Czech Technical University in Prague. Prague*, May 2010.
 21. **Jana T., Wald F., Kyzlik P.** (2010), Beams with corrugated web at elevated temperatures in fire. *Centre for Integrated Design of Advanced Structures*, 2010

THE FIRE HEATING OF STEEL GIRDERS WITH CORRUGATED WEBS

*Lyudmila Lavrinenko
Valeriya Nekora*

Summary. To develop studies of steel beams with sinusoidal corrugated sheets, work was carried out to study the behaviour of such beams under the influence of elevated temperatures in case of fire. The regulatory requirements for the design of corrugated beams are considered. Although studies of the mechanical behaviour of corrugated beams are relatively large, specific methods for calculating the mechanical behaviour of these beams at high temperatures are insufficient.

It is shown that the calculation of fire resistance according to the design rules Eurocode 3 applies to beams with flat walls.

The results of some field studies are discussed. They confirm the discrepancy between the experimental results for corrugated beams and the results obtained in accordance with design standards.

The article analyzes the heating parameters of steel beams with a corrugated sheet, taking into account their design features and comparison with similar parameters of a flat beam of a beam. It is necessary to conduct a study using the differential heat equation.

Work was carried out to determine the patterns of changing the heating parameters of corrugated steel beams in case of fire as a scientific basis for calculating their fire resistance.

Keywords: fire resistance; steel beam; corrugated web; heating parameters