

УДК 614.841.332

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-43-53>

А.І. Ковальов
Р.Р. Пурденко
Ю.А. Отрош
В.І. Томенко
Є.В. Качкар
Р.І. Майборода

ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК

Мета. Розробка комп'ютерної моделі для дослідження вогнестійкості сталевих конструкцій, захищених вогнезахисними покриттями, на прикладі вогнезахисної сталеві балки, яка створена в програмному комплексі ЛІРА-САПР (Україна).

Методи. Метод кінцевих елементів, застосування розрахункових методів чисельного моделювання програмного комплексу ЛІРА-САПР, математичне моделювання теплових процесів нестационарної теплопровідності.

Результати. Розроблено комп'ютерну модель в програмному комплексі ЛІРА-САПР, за допомогою якої проведено теплотехнічний розрахунок балки. Модель дозволяє оцінювати вогнестійкість як незахищених, так і вогнезахисних сталевих балок, враховувати властивості матеріалу балки та матеріалу вогнезахисного покриття. Особливістю моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві балки полягає у задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття при розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності. Результати розрахункового визначення вогнестійкості вогнезахисної сталеві балки порівнювали з експериментальними даними. В результаті встановлено задовільну збіжність результатів розрахункового та експериментального дослідження вогнестійкості (похибка не більше 12%). Проаналізовані результати експериментального визначення вогнестійкості ненавантажених балок в умовах вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі. Проведено оцінку точності розробленої комп'ютерної моделі з результатами експерименту.

Наукова новизна. Розроблено скінченно-елементну модель вогнезахисної сталеві балки в програмному комплексі ЛІРА-САПР, що дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю проводити розрахунок меж вогнестійкості балок, захищених вогнезахисними покриттями з науково обґрунтованими параметрами.

Практична значимість. Полягає у створенні основ щодо розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій, захищених вогнезахисними покриттями, шляхом створення комп'ютерних моделей, здатних проводити розрахунок вогнестійкості. За рахунок цього має відбутися значне здешевлення робіт з оцінювання вогнестійкості і, як наслідок, підвищення ефективності заходів з підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, комп'ютерна модель, моделювання, сталеві балка, чисельне моделювання, ЛІРА-САПР.

Вступ.

Глобалізація у світі призводить до посилення техногенних чинників. Проблема захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, а також від небезпек військового характеру, у сучасних умовах набуває особливої значущості. Це обумовлено щорічним стійким зростанням кількості і масштабів катастроф, істотним зростанням людських і матеріальних втрат. Підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд є однією з найважливіших складових забезпечення захисту населення та економіки від сучасних загроз. Пожежі і вибухи на таких об'єктах небезпечні не лише людськими, але і значними матеріальними витратами, що пов'язані з ліквідацією

наслідків руйнувань і відновленням працездатності об'єктів.

Нові технології будівництва передбачають широке застосування різноманітних будівельних матеріалів та конструкцій, застосування яких передбачає обов'язкові нормативні вимоги в частині дотримання безпеки експлуатації будівель та споруд. Одним з факторів, на якому ґрунтуються вимоги пожежної безпеки під час проектування, будівництва, реконструкції, зміни функціонального призначення будівель та споруд різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Для цього на об'єктах різного призначення необхідно забезпечити збереження несучої здатності будівельних конструкцій, в тому числі і сталевих. Одним із пріоритетних напрямків

забезпечення вогнестійкості будівель та споруд є використання вогнезахисних будівельних конструкцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Велика кількість робіт присвячена питанням оцінювання вогнестійкості вогнезахисних і незахищених сталевих конструкцій. В [1] запропоновано використовувати програмне забезпечення SAFIR, за допомогою якого розроблено кінцево-елементну модель для чисельного моделювання поведінки будівельних конструкцій при дії вогнища пожежі. Однак незважаючи на практичну значимість таких результатів слід зазначити, що поза увагою дослідників залишилися питання моделювання теплового стану вогнезахисних сталевих конструкцій. Очевидно це пов'язано з труднощами побудови вогнезахисної конструкції у вказаному програмному комплексі і правильному і точному задаванні параметрів вогнезахисних покриттів. В [2] описуються експериментальні дослідження поведінки при підвищених температурах незахищених і вогнезахисних сталевих балок, що мають різні розміри і форму отворів. Експерименти показали суперечливі дані щодо вогнестійкості балок при підвищених температурах, виду матеріалу вогнезахисного покриття і його мінімальної товщини. При цьому відсутні достовірні дані щодо поведінки інших вогнезахисних конструкцій при підвищених температурах. В [3] наведені дані щодо побудови скінченно-елементних моделей сталевих балок, використовуючи сучасні програмні комплекси ANSYS та OpenSEES. Моделі дозволяють враховувати вплив температурного режиму пожежі та постійного механічного навантаження. Однак, до недоліків дослідження слід віднести неможливість врахування в процесі моделювання наявності систем вогнезахисту. Спроби зняти вказані обмеження наводяться в [4], де проведено чисельне моделювання поведінки сталевих конструкцій підданих впливу вогнища пожежі. Проте, незважаючи на переваги такого підходу, відкритим залишається питання дослідження вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. В [5]

наводяться результати експериментального дослідження вогнезахисних характеристик спучених покриттів, які піддалися впливу трьох нестандартних кривих пожежі. Ефективну теплопровідність спучених покриттів розраховували на основі вимірної температури сталі та печі. Однак незважаючи на практичну значимість таких результатів слід зазначити, що поза увагою дослідників залишилися питання моделювання теплового стану вогнезахисних сталевих конструкцій і порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. У [6] наводяться експериментальні дані щодо випробувань, проведених на сталевих пластинах, з різними геометричними розмірами. Пластини були захищені реактивними вогнезахисними покриттями на водній основі. Експерименти були направлені на дослідження теплових властивостей вогнезахисних сталевих пластин при різних температурних режимах пожежі: стандартному та режиму, що повільно розвивається. Однак, поза увагою дослідників залишилися питання розрахункового визначення вогнестійкості конструкцій, використовуючи сучасні програмні комплекси. В [7] приведені результати експериментальних досліджень вогнестійкості сталевих балок без вогнезахисту. Температури, отримані в результаті експерименту, порівняли з розрахунками, виконаними згідно Єврокоду 3. Проте, методи, що запропоновані в даному дослідженні, не дозволяють оцінювати вогнестійкість балок, покритих вогнезахисними покриттями. В [8] досліджено поведінку сталевих порожнистих колон при підвищених температурах. Розроблені кінцево-елементні моделі для чисельного моделювання поведінки сталевих колон за підвищених температур. Проте не визначено, як дані моделі можливо застосовувати для вогнезахисних сталевих конструкцій. З практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з врахуванням теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості сталевих конструкцій. В [9] авторами проведено експериментальне дослідження круглих заповнених бетоном сталевих трубчастих колон, захищених реактивними вогнезахисними покриттями згідно стандарту ISO-834. Проте недослідженими залишилися питання

визначення меж вогнестійкості будівельних конструкцій із сталі за допомогою комп'ютерного моделювання теплових процесів, що відбуваються у конструкціях, із застосуванням сучасних програм. Це накладає певні обмеження на аналіз вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

Систематизація проведених досліджень дає змогу констатувати тенденцію поширення підходів до дослідження вогнестійкості сталевих конструкцій з вогнезахистом за допомогою розроблених комп'ютерних моделей в сучасних ліцензованих програмних комплексах. Такий підхід повинен враховувати можливість прогнозування меж вогнестійкості конструкцій із сталі з врахуванням типу вогнезахисного покриття, характеристик матеріалу конструкції та покриття, зміни режимів пожежі для різних завдань підвищення рівня пожежної безпеки на об'єктах. Метод, розроблений на основі вищезгаданого підходу, повинен бути адекватним, інформативним, а результати, отримані в результаті використання методу, – відтворюваними та стійкими.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність можливості визначення меж вогнестійкості конструкцій із сталі з вогнезахистом за допомогою адекватних комп'ютерних моделей, які дозволили б моделювати нестационарний прогрів таких конструкцій. При цьому, такі моделі повинні мати можливість визначати температуру в будь-якому перерізі конструкції (в будь-якій точці та момент часу) за умов впливу стандартизованих температурних режимів пожежі та враховувати параметри систем вогнезахисту. Модель повинна базуватися на отриманні

результатів з необхідною для інженерних розрахунків точністю як з використанням даних експериментальних досліджень, так і розрахунковими методами.

Мета статті (постановка завдання).

Проведені дослідження ставили за мету розробку комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій на прикладі вогнезахисної сталеві балки, яка створена в програмному комплексі ЛПА-САПР (Україна).

Основні завдання дослідження:

- побудувати комп'ютерну модель нестационарного прогріву коротких сталевих вогнезахисних ненавантажених балок двотаврового перерізу для оцінювання вогнестійкості в програмному комплексі ЛПА-САПР;
- провести моделювання прогріву сталеві балки із системою вогнезахисту без прикладення навантаження;
- оцінити точність розробленої комп'ютерної моделі вогнезахисної сталеві балки.

Методи дослідження.

Об'єктом випробування були дві сталеві балки ІРЕ 400 (приведена товщина 5,309 мм, коефіцієнт перерізу $A_m/V=188,4 \text{ м}^{-1}$), довжиною по 1 м, які перед нанесенням вогнезахисної речовини були покриті шаром ґрунту ГФ-021 товщиною 0,05 мм. Товщина покриття для зразка балки № 1 складала 0,232 мм, для зразка балки № 2 – 1,183 мм. До нанесення покриття згідно до ДСТУ Б В.1.1-17-2007 на кожній короткій балці встановлювалося по 10 термопар ТХА, схема розміщення яких представлена на рис. 1.

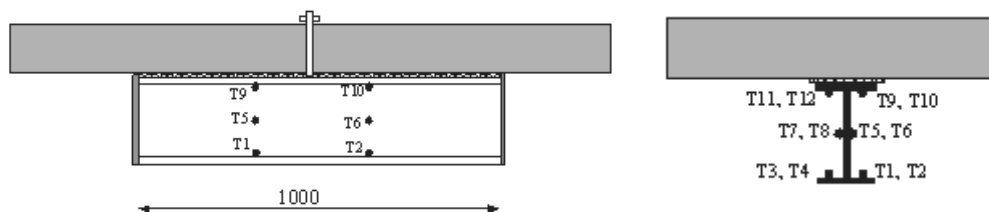


Рис. 1. Схема розташування термопар на ненавантаженої балці.

Бокові торці балок закривалися накладками з теплоізоляційних плит товщиною 40 мм за допомогою 4 шпильок на кожному зразку. Зразки коротких балок приєднувалися (підвішувалися) через шар

мулітокремнеземистого фетру (керамічна мінвата) до плит покриття печі (товщиною 250 мм) за допомогою шпильок.

Середня витрата реактивної вогнезахисної речовини в рідкому стані під час нанесення складала $1,79 \text{ кг/м}^2$. Температура повітря при експериментах складала 27°C , а відносна вологість повітря 54% . На рис. 2

зображено загальний вигляд балки №1 з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття до (а) та після (б) проведення випробувань.



Рис. 2. Вогнезахисна сталева балка (№ 12) до (а) та після (б) проведення експерименту з мінімальним значенням товщини вогнезахисного покриття.

Експерименти проводили в випробувальній печі (СВП-1) № 2 (атестат № 24-2/1918), використовували засоби

вимірювальної техніки, що були метрологічно повірені.

Експерименти проводили згідно стандартного температурного режиму пожежі, що показано на рис. 3.

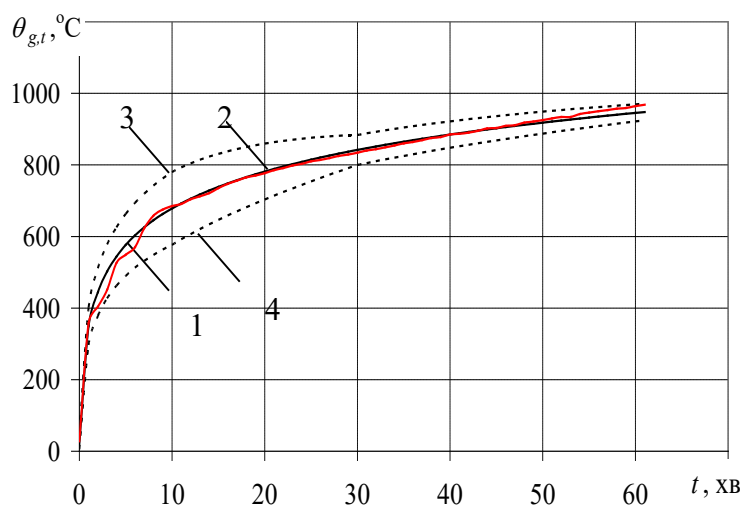


Рис. 3. Температурний режим при проведенні випробування балки №1 з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття: 1 – стандартний режим; 2 – реальний режим; 3 – максимальний режим; 4 – мінімальний режим.

Залежність середніх температур зразків коротких сталевих балок з реактивним вогнезахисним покриттям мінімальної та максимальної товщини від часу вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі показано на рис. 4.

З температурами, представленими на рис. 4, порівнювали розрахункові температури, отримані в результаті моделювання теплового впливу на сталеву

балку із вогнезахистом виконані в ЛПРА-САПР.

Побудова комп'ютерної моделі нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві балки

Алгоритм розробки комп'ютерної моделі нестационарної теплопровідності сталеві балки із вогнезахистом в програмі ЛПРА-САПР, являв собою систему рівнянь, розв'язок яких дозволив отримати значення температури у кожному вузлі координатної

сітки так, щоб її вузли розміщувалися по товщині і по периметру перерізу. Найважливішим етапом кінцево-елементного аналізу є створення сітки кінцевих елементів.

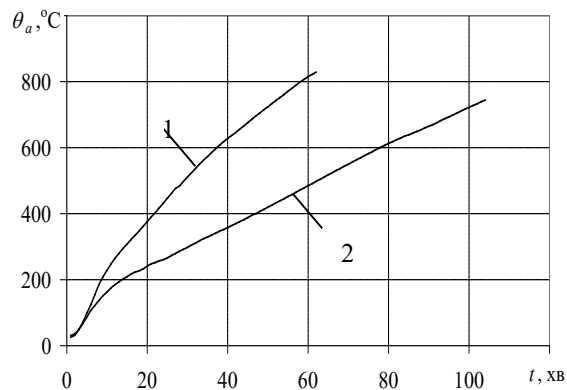


Рис. 4. Залежність середніх температур зразків коротких сталевих балок з реактивним вогнезахисним покриттям мінімальної та максимальної товщини: 1 – зразок балки № 1; 2 – зразок балки № 2.

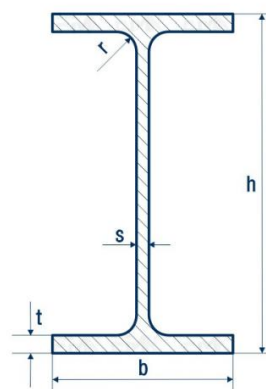
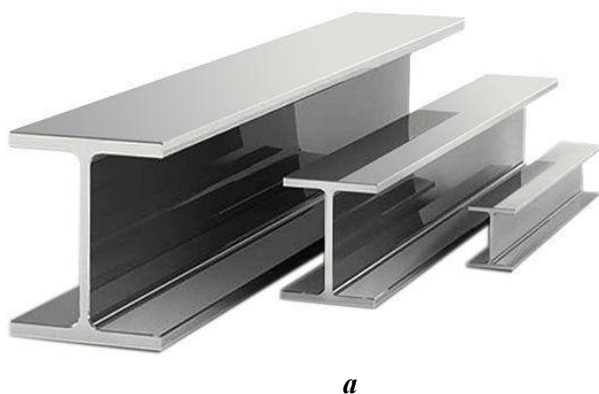


Рис. 5. Загальний вигляд (а) та геометричні розміри (б) сталевих балок.

Зменшення розмірів призведе до збільшення значної кількості кінцевих елементів, а це призведе до збільшення часу розрахунку і використання більш потужної обчислювальної техніки, а на аналіз результатів впливу не матиме. На рис. 5 показано загальний вигляд (а) та вигляд поперечного перерізу сталевих балок (б) для моделювання її створення в програмному середовищі ЛІРА-САПР.

Було побудовано комп'ютерну модель вогнезахисної сталевих балок, призначено типи жорсткості, вибрано крок розбивки балки на елементи (рис. 6). Модель складається з 42908 елементів. Крок розбиття

Точність розрахунку за допомогою методу кінцевих елементів залежить від правильного вибору типів та розмірів кінцевих елементів. Була обрана прямокутна сітка з чотирма вузлами, що дає точніші результати, ніж сітка з трикутними елементами, що пояснюється наступним чином. Дрібна сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій чи напруг (отвір, виточення, тріщина тощо). У той же час сітка великих розмірів може застосовуватися в зонах з деформаціями або напруженнями, що мало змінюються, а також в областях, що не становлять особливої цікавості для розрахунків. Таким чином, сітка кінцевих елементів має в основі наближені до квадратів елементи, що є для розрахунку матриці ідеальним варіантом, довжина елементів не перевищує 1/10 розміру поперечного перерізу, що відповідає рекомендації по формуванню сітки кінцевих елементів.

по перерізу склав $h=0,01$ м, часовий крок $\Delta t=60$ с.

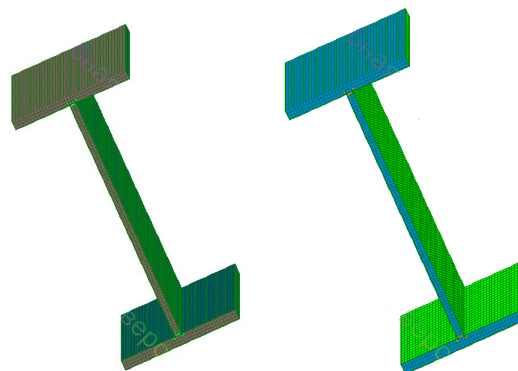


Рис. 6. Модель вогнезахисної сталевих балки в 3D постановці

Алгоритм розрахунку полягав у визначенні температури у кожному вузлі перерізу розробленої розрахункової моделі.

Моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної сталевій балки

Для дослідження вогнестійкості в розрахунках нестационарного прогріву сталевій балки, захищеної вогнезахисним покриттям, використали теплофізичні характеристики покриття [10-11]: коефіцієнт теплопровідності (рис. 7) і питому теплоємність, що дорівнює 70,4 Дж/кг·°С.

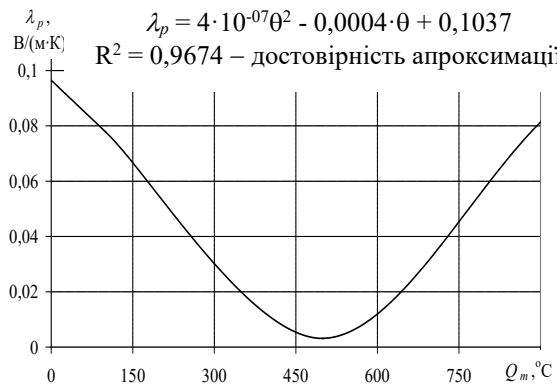


Рис. 7. Коефіцієнт теплопровідності реактивного вогнезахисного покриття.

При розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності визначали залежність температури вогнезахищеної сталевій балки від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі. При цьому використовували математичну модель, яка містить такі рівняння [12, 13]:

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < d_p; \quad \theta_p = \theta_p(x, t); \quad 0 < t < t_{fi,requ}$$

$$- \text{початкова умова: } \theta_p(x, 0) = \theta_0, \quad (2)$$

- гранична умова на обігрівній поверхні покриття, при $x = d_p$:

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \alpha^* (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (3)$$

$$\text{де } \alpha^* = \alpha_c + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] / (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (4)$$

- гранична умова на внутрішній поверхні покриття, при $x = 0$:

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = C_a \cdot \rho \frac{V}{A_p} \cdot \frac{\partial \theta_p}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\theta_a(t) = \theta_p(0, t), \quad (6)$$

де x – координата в покритті ($x = 0$ відповідає місцю контакту покриття зі сталевією поверхнею), м;

t – час, с;

$t_{fi,requ}$ – час, який відповідає нормованій межі вогнестійкості;

α_c – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні покриття, $\alpha_c = 25$ Вт/(м·°С);

α^* – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на неогірівній поверхні балки, $\alpha^* = 5$ Вт/(м·°С);

Φ – кутовий коефіцієнт, $\Phi = 1,0$;

ε_m – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття, $\varepsilon_m = 0,8$;

ε_f – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я, $\varepsilon_f = 1,0$;

σ – стала Стефана Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°С⁴);

θ_a – температура сталі, °С;

$\theta_{g,t}$ – температура газового середовища в момент часу t , яка змінюється за стандартним температурним режимом пожежі (рис.3), °С;

θ_m – температура обігрівної поверхні покриття, °С;

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

θ_p – температура покриття, °С;

λ_p – коефіцієнт теплопровідності покриття, Вт/(м·°С);

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

c_p – питома теплоємність покриття, Дж/(кг·°С);

ρ_p – густина покриття, $\rho_p = 1420$ кг/м³ (дані виробника);

ρ_a – густина сталі, $\rho_a = 7850$ кг/м³;

A_p/V – коефіцієнт перерізу вогнезахищеної сталевій балки, м⁻¹.

Теплопровідність λ_a (Вт/(м·°С)) та питому теплоємність сталі c_a (Дж/(кг·°С)) визначали за формулами згідно [14].

Коефіцієнт Пуассона сталі $\nu = 0,3$, модуль пружності – $E_s = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Розподіли температур у вогнезахищеній сталевій балці, отримані чисельним моделюванням в умовах випробувань при стандартному температурному режиму пожежі, показані на рис. 8.

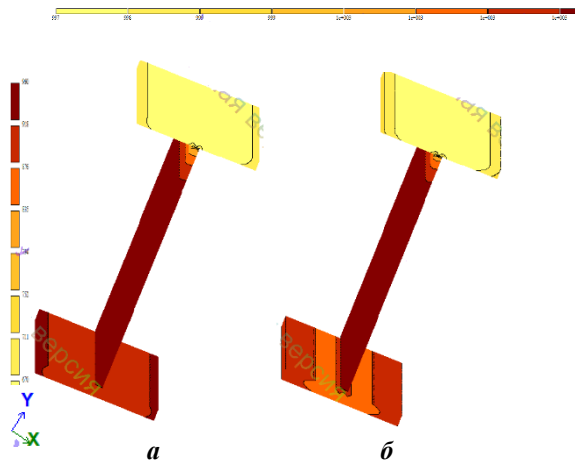


Рис. 8. Розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з *максимальною* товщиною вогнезахисного покриття на 90 (а) та 103 (б) хвилині випробування.

Розроблена модель в програмному комплексі ЛПРА-САПР враховує радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні вогнезахисної сталевій балці та теплообмін теплопровідністю у вогнезахисній балці. Під час моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної сталевій балки в програмному комплексі ЛПРА-САПР використана модель балки (рис. 8, 9), яка обігривається з трьох сторін за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

На рис. 9 показано розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття на 30 (а), 45 (б) та 61 (в) хвилині випробування.

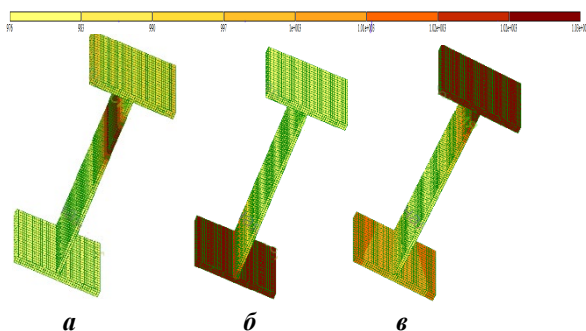


Рис. 9. Розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з *мінімальною* товщиною вогнезахисного покриття на 30 (а), 45 (б) та 61 (в) хвилині випробування.

Розрахунки проводилися на ліцензованому програмному забезпеченні в програмному комплексі ЛПРА-САПР

(ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

Оцінка точності розробленої комп'ютерної моделі вогнезахисної сталевій балки

Як видно з рис. 10 розрахункова крива 2 співпадає з експериментальною кривою 1. При цьому максимальне відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось до 10 хвилини розрахунку і становило 13 °С, що відповідає похибці не більше 12 %.

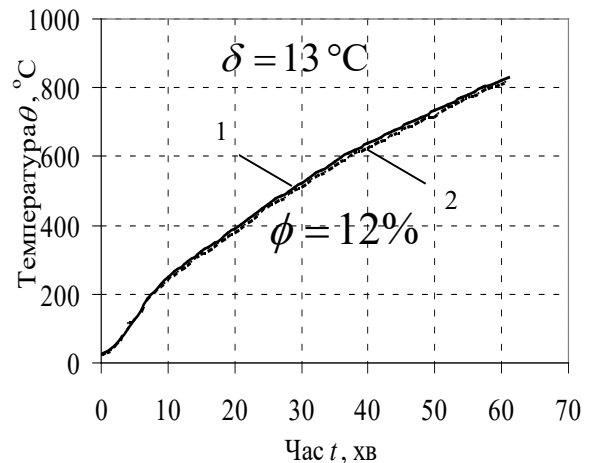


Рис. 10. Середня температура короткої вогнезахисної сталевій балки № 1:
1 – експеримент; 2 – розрахунок.

Дані, зображені на рис. 10, вказують на правильність задавання параметрів моделі в процесі моделювання теплового впливу на конструкцію в системі «сталеві балка – вогнезахисне покриття». Результати розрахунків співпадають з результатами експериментальних досліджень (похибка 12 %), що дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій, а саме балок двотаврового перерізу. Виходячи з результатів, зображених на рис.10, можна констатувати факт щодо правильності створення комп'ютерної моделі вогнезахисної сталевій балки в програмному комплексі ЛПРА-САПР, правильності задавання параметрів моделі, початкових та граничних умов. Для доведення цього твердження достатньо дослідити характер кривих зміни середньої температури вогнезахисної сталевій балки від часу вогневого впливу (рис. 10). Це не розходиться з експериментальними даними (рис.10, крива

1), так як розрахункова крива (рис.10, крива 2) зміни середньої температури вогнезахищеної балки від часу вогневого впливу задовільно корелює з експериментальною. Це в свою чергу говорить про задовільну адекватність розробленої комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталеві балки [13].

Обговорення результатів.

Мету роботи було вирішено шляхом оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахистом шляхом розробки комп'ютерної моделі, яка створена в програмному комплексі ЛПРА-САПР (Україна). За допомогою розробленої моделі було проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталеві балки, що полягало у розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності і зводилося до визначення температури сталі балки із вогнезахистом у будь-якій точці поперечного перерізу в заданий проміжок часу (рис. 8, 9). Розрахунки підтвердили правильність задавання граничних умов, параметрів фізичної та математичної моделей, що дозволили з точністю до 12 % розрахувати розподіл температур у захищасмій конструкції. Підтвердженням цьому є дані рис. 10, на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур. Особливістю розробленої моделі є можливість здійснювати прогрів сталевих конструкцій з урахуванням теплофізичних характеристик матеріалів та врахування складного теплообміну. Запропонована модель дозволяє досліджувати фізичні процеси, що відбуваються саме в вогнезахищених конструкціях із сталі, з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Таких переваг, що проявляються у можливості врахування характеристик вогнезахисних покриттів, не вдалося досягнути у відомих роботах [1, 3], так як не вдалося врахувати теплофізичні характеристики (теплопровідність, теплоємність) вогнезахисних покриттів у вигляді залежностей від температури та

побудувати скінчено-елементну модель вогнезахищеної конструкції. Розвиток даного дослідження може полягати у розробці комп'ютерної моделі, яка б дозволяла оцінювати вогнестійкість будівель та споруд при сумісній роботі як сталевих, так і залізобетонних вогнезахищених і незахищених будівельних конструкцій.

Висновки.

1. Розроблено комп'ютерну модель для розрахунку меж вогнестійкості сталевих конструкцій (на прикладі сталеві балки із вогнезахистом), яка дозволяє моделювати тепловий вплив на конструкцію та враховувати теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція. Обґрунтовані теплофізичні і механічні властивості матеріалів, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахищеної сталеві конструкції без статичного навантаження.

2. За допомогою розробленої моделі отримано розподіл температур у вогнезахищених сталеві балці без прикладеного до неї навантаження при заданому температурному режимі пожежі, суть якого полягала у розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності.

3. Проведено оцінку точності розробленої моделі та порівняння результатів експерименту з розрахунковими даними. В результаті встановлено, що розрахункові та експериментальні температури прогріву вогнезахищених сталевих балок задовільно корелюють між собою, а похибка не перевищує 12 %. Це вказує на правильність задавання початкових та граничних умов, побудови комп'ютерної моделі теплових процесів в системі «сталеві конструкція - вогнезахисне покриття». Доведено, що розроблена комп'ютерна модель дозволяє моделювати реальні процеси, що відбуваються при нагріванні ненавантажених вогнезахищених сталевих балок в умовах впливу заданого температурного режиму пожежі.

Список літератури

1. Franssen J. M., Gernay T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8(3). P. 300–323. URL: <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
2. Nadjai A., Petrou K., Han S., Ali F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire

- conditions. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. P. 579–588.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150>.
3. Džolev I., Radujković A., Cvetkovska M., Ladinović Đ., Radonjanin V. Fire analysis of a simply supported steel beam using Opensees and Ansys Workbench. In *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica*. 2016. Vol. 22. P. 315–322.
 4. Both I., Wald F., Zaharia R. Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*. 2016. Vol. 14(2). P. 275–284. URL: <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
 5. Wang L., Dong Y., Zhang C., Zhang D. Experimental Study of Heat Transfer in Intumescent Coatings Exposed to Non-Standard Furnace Curves. *Fire Technology*. 2015. Vol. 51(3). P. 627–643. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0460-7>.
 6. Yew M. C., Ramli Sulong N. H. Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*. 2012. Vol. 34. P. 719–724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
 7. Łukomski M., Turkowski P., Roszkowski P., Papis B. Fire Resistance of Unprotected Steel Beams-Comparison between Fire Tests and Calculation Models. In *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. P. 665–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.078>.
 8. Yan X., Gernay T. Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 196. 107403. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.
 9. Song Q. Y., Han L. H., Zhou K., Feng Y. Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018)* Hong Kong Institution of Steel Construction. <https://doi.org/10.18057/ICASS2018.P.164>.
 10. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC Technology center, 180. doi: <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>.
 11. Kovalov A., Slovinskyi V., Udianskyi M., Ponomarenko I., Anszczak M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10.
 12. Kovalov A., Otrosh Y., Chernenko O., Zhuravskij M., Anszczak M. Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in Ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038 MSF. P. 514–523.
 13. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Чинний від 2017-04-01. Вид. офіц. Київ: НДІБК, 2016. 136 с.
 14. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.
- ### References
1. Franssen, J. M., & Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
 2. Nadjai, A., Petrou, K., Han, S., & Ali, F. (2016). Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. *Construction and building materials*, 105, 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150>.
 3. Džolev, I., Radujković, A., Cvetkovska, M., Ladinović, Đ., & Radonjanin, V. (2016, April). Fire analysis of a simply supported steel beam using Opensees and Ansys Workbench. In *4th International conference contemporary achievements in civil engineering, Subotica* (Vol. 22, pp. 315-322).
 4. Both, I., Wald, F., & Zaharia, R. (2016). Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(2), 275–284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
 5. Wang, L., Dong, Y., Zhang, C., & Zhang, D. (2015). Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves. *Fire Technology*, 51(3), 627–643. <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0460-7>.
 6. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
 7. Łukomski, M., Turkowski, P., Roszkowski, P., & Papis, B. (2017). Fire resistance of unprotected steel beams-comparison between fire tests and calculation models. In *Procedia Engineering*, 172, 665–672. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.078>.
 8. Yan, X., & Gernay, T. (2022). Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107403. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.
 9. Song, Q. Y., Han, L. H., Zhou, K., & Feng, Y. (2020). Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. In *Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Steel Structures, ICASS 2018*. Hong Kong Institution of Steel Construction. <https://doi.org/10.18057/ICASS2018.P.164>.
 10. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: privat company Technology center, 180. doi: <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>.
 11. Kovalov, A., Slovinskyi, V., Udianskyi, M., Ponomarenko, I., Anszczak, M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10.
 12. Kovalov, A., Otrosh, Y., Chernenko, O., Zhuravskij, M., Anszczak, M. Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in Ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. In *Materials Science Forum*.

2021. Vol. 1038 MSF. P. 514–523. Trans Tech Publications Ltd.
13. DSTU-N В V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist. Chynnyi vid 2017-04-01. Vyd. ofits. Kyiv: NDIBK, 2016. 136 s (Ukrainian).
14. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

Надійшла до редакції 07.11.2022

Рецензент д-р. техн. наук, с.н.с. Юрій КЛЮЧКА

Ковальов Андрій Іванович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: kovalev27051980@gmail.com

Пурденко Роман Русланович – ад'юнкт, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: proektbs1977@ukr.net

Отрош Юрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Томенко Віталій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: firech1996@gmail.com

Качкар Євген Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: kachkar@ukr.net

Майборода Роман Ігорович – викладач, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: maiboroda.roman@ukr.net

ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF STEEL BEAMS

Purpose. Development of a computer model for the study of fire resistance of steel structures protected by fire-resistant coatings, using the example of a fire-resistant steel beam created in the LIRA-SAPR software complex (Ukraine).

Methods. Finite element method, application of computational methods of numerical modelling of the LIRA-SAPR software complex, mathematical modelling of thermal processes of non-stationary thermal conductivity.

Results. A computer model was developed in the LIRA-SAPR software complex, with the help of which thermal engineering calculation of the beam was carried out. The model makes it possible to evaluate the fire resistance of both unprotected and fire-protected steel beams, to take into account the properties of the beam material and the material of the fire-resistant coating. The peculiarity of modelling the non-stationary heating of a fire-resistant steel beam is to specify the thermophysical characteristics of the fire-resistant coating when solving the problem of non-stationary thermal conductivity. The results of the calculated determination of the fire resistance of the fire-resistant steel beam were compared with experimental data. As a result, a satisfactory convergence of the results of the calculation and experimental study of fire resistance was established (the error is no more than 12%). The results of the experimental determination of the fire resistance of unloaded beams under fire conditions of the standard fire temperature regime were analysed. The accuracy of the developed computer model was evaluated with the results of the experiment.

Scientific novelty. A finite-element model of a fire-resistant steel beam has been developed in the LIRA-SAPR software complex, which allows calculating the fire resistance limits of beams protected by fire-resistant coatings with scientifically justified parameters with sufficient accuracy for engineering calculations.

Practical significance. It consists in creating the basis for the calculated assessment of fire resistance of building structures protected by fire-resistant coatings by creating computer models capable of performing fire resistance calculations. Due to this, there should be a significant reduction in the cost of work on fire resistance assessment and, as a result, an increase in the effectiveness of measures to increase the fire resistance of building structures.

Keywords: fire resistance, computer model, simulation, steel beam, numerical simulation, LIRA-SAPR.

Andrii Kovalov – Phd, Senior Research, Doctoral studies, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevsk str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: kovalev27051980@gmail.com

Roman Purdenko – National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevsk str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Yurii Otrosh – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Fire prevention in settlements, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevsk str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Vitalii Tomenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Cherkasy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, (Onoprienka str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: firech1996@gmail.com

Evhen Kachkar – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Cherkasy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, (Onoprienka str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: kachkar@ukr.net

Roman Maiboroda – teacher, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: maiboroda.roman@ukr.net