

## УДК 614.841.332

- А. І. Ковальов<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., докторант (ORCID 0000-0002-6525-7558)*  
*Ю. А. Отрош<sup>1</sup>, д.т.н., професор, нач. каф. (ORCID 0000-0003-0698-2888)*  
*Н. В. Рашкевич<sup>1</sup>, PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0001-5124-6068)*  
*С. В. Рудаков<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8263-0476)*  
*В. І. Томенко<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-7139-9141)*  
*С. П. Юрченко<sup>3</sup>, судовий експерт-вибухотехнік (ORCID 0000-0002-2775-238X)*

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

<sup>2</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, Україна

<sup>3</sup>Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, Черкаси, Україна

## ОЦІНКА ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ

Розроблено структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій на основі розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Метод відрізняється від наявних можливістю визначати часу досягнення критичної температури вогнезахисної сталеві конструкції в залежності від товщини вогнезахисного покриття, тривалості вогневого впливу, сценарію пожежі, заданого рівня навантаження, теплофізичних характеристик сталі та вогнезахисного покриття, а також можливістю використання експериментальних значень при проведенні випробувань на вогнестійкість як сталевих конструкцій, так і зразків зменшених розмірів, що полегшує процедуру оцінювання вогнестійкості. Метод доцільно використовувати при розрахунку вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій в результаті проектування вогнезахисту сталевих конструкцій. Розроблено комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисної сталеві балки в програмному забезпеченні «ЛІРА-САПР» для підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд. Проведено статичний розрахунок вогнезахисної сталеві балки, в результаті якого отримано напружено-деформований стан балки при сумісній дії силових і температурних навантажень. Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з результатами експериментального дослідження вогнестійкості. Встановлено параметри моделі, а саме: теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, міцнісні та деформаційні властивості матеріалів при високотемпературних та силових впливах, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю (до 3 %) оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій.

**Ключові слова:** вогнезахисні сталеві конструкції, оцінювання вогнестійкості, чисельне моделювання, вогнезахисні покриття, ЛІРА-САПР

### 1. Вступ

Згідно статистичних даних про пожежі встановлено, що за останні десять років в Україні в будівлях та спорудах трапилося понад 250 тисяч пожеж, з яких в середньому знищено або пошкоджено 22353 будівлі та споруди різного призначення, з яких 4281 будівля зруйнована повністю. Це вказує на те, що одним з факторів, на якому ґрунтується пожежна безпека під час проектування, будівництва та експлуатації будівель та споруд різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Нові технології будівництва передбачають широке застосування різноманітних будівельних конструкцій, використання яких, як правило, передбачає обов'язкові нормативні вимоги в частині дотримання відповідності меж вогнестійкості та поширення вогню. Зазначені вимоги можуть бути забезпечені комплексом заходів, що передбачається як технологією виконання будівельних конструкцій, так і застосуванням вогнезахисних покриттів. Одним із шляхів підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій є застосування ефективних вогнезахисних покриттів із науково обґрунтованими параметрами, що мають забезпечити нормативний рівень вогнестійкості, що сприятиме підвищенню пожежної безпеки будівель та споруд.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Забезпечення вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій є підґрунтям наукових основ підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів шляхом їх вогнезахисту з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Вказане питання є досить складною проблемою, розв'язання якої дозволить на стадії проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд застосовувати вогнезахисні будівельні конструкції, які здатні забезпечити стійкість об'єкту при високотемпературному та силовому впливах.

Дослідженнями щодо експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій займалися багато вчених.

В [1] запропоновано використовувати програмне забезпечення SAFIR, за допомогою якого розроблено скінчено-елементну модель для чисельного моделювання поведінки будівельних конструкцій при дії вогнища пожежі. Проте, слід зазначити, що поза увагою дослідників залишилися питання моделювання теплового та напружено-деформованого стану вогнезахисних сталевих конструкцій. Очевидно це пов'язано з труднощами побудови вогнезахисної конструкції у програмному комплексі, правильному і точному задаванні параметрів вогнезахисних покриттів.

В [2] досліджено ефективність та вплив різних реактивних вогнезахисних покриттів на експлуатаційні властивості сталевих конструкцій у разі пожежі. Однак, не зважаючи на оригінальність отриманих результатів, експерименти проводилися на зразках зменшених розмірів. Це не завжди дозволяє з достатньою точністю підходити до оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. В роботі більше уваги приділено вивченню властивостей досліджуваних реактивних вогнезахисних покриттів, а не дослідженню вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій при сумісному високотемпературному та силовому впливах.

В [3] описуються експериментальні дослідження поведінки при підвищених температурах незахищених і вогнезахисних сталевих балок різних розмірів і форми отворів. Експерименти показали суперечливі дані щодо вогнестійкості балок при підвищених температурах, виду вогнезахисного покриття, мінімальної товщини. При цьому не висвітленими залишилися питання щодо комплексного врахування найбільш значущих чинників в системі «будівельна конструкція–вогнезахисне покриття» (товщини покриття, теплофізичних та міцнісних характеристик, режиму пожежі, кліматичних факторів) для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

Автори [4] пропонують використовувати при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій постійне значення коефіцієнту теплопровідності реактивного вогнезахисного покриття. Таке припущення дозволяє оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій, проте впливає на точність розрахунків та накладає обмеження на оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою розроблених моделей. Тому що, як відомо [5–6], найбільша точність розрахунків спостерігається при задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів, які залежать від температури.

В [7] розроблені скінчено-елементні моделі сталевих балок, використовуючи сучасні програмні комплекси ANSYS та Open SEES. Моделі дозволяють враховувати високотемпературні та силові впливи на конструкції. Однак, до

недоліків дослідження слід віднести неможливість врахування в процесі моделювання роботи вогнезахисних покриттів. Спроби зняти вказані обмеження наводяться в [8], 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 [9] досліджено поведінку сталевих порожнистих колон при підвищених температурах. Розроблені скінчено-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.

У [10] були досліджені реактивні вогнезахисні покриття та вивчені їх експлуатаційні характеристики з використанням чотирьох різних режимів пожежі (стандартний, вуглеводневої пожежі і дві самостійно розроблені криві зі зниженою температурою). Проте, не в повній мірі були досліджені питання щодо розрахункового визначення вогнестійкості сталевих конструкцій з використанням вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами.

В [11] проведено експериментальне дослідження круглих заповнених бетоном сталевих трубчастих колон, захищених реактивними вогнезахисними покриттями. Проте невисвітленими залишилися питання визначення меж вогнестійкості будівельних конструкцій із сталі за допомогою комп'ютерного моделювання теплових процесів, що відбуваються у конструкціях, із застосуванням сучасних програмних комплексів. Це накладає певні обмеження на аналіз вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

З проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що поза увагою дослідників залишилися питання обґрунтування найбільш значущих чинників впливу на вогнезахисні властивості покриттів як підґрунтя для наукових основ підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів шляхом застосування вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами та інженерних розрахунків при проектуванні та будівництві нових об'єктів.

У згаданих роботах основна увага приділялась в основному питанням підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій, у той час, як питання щодо обґрунтування параметрів вогнезахисних покриттів вогнезахисних будівельних конструкцій після впливу на них найбільш значущих чинників задля забезпечення вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій, досліджувались значно рідше, або взагалі не розглядались.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність можливості оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою адекватних комп'ютерних моделей, які дозволяють моделювати сумісний високотемпературний та силовий впливи на вогнезахисні сталеві конструкції. При цьому, такі моделі повинні мати можливість визначати температуру в перерізі конструкції (в будь-якій точці та момент часу) за умов впливу різних чинників: товщини покриття, теплофізичних характеристик покриття та будівельної конструкції, механічних характеристик будівельної конструкції, режиму пожежі, кліматичних факторів.

### 3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій за допомогою розроблених комп'ютерних моделей теплового та напружено-деформованого стану в програмному забезпеченні «ЛІРА-САПР» для підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

- розробити структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій;
- розробити комп'ютерну модель аналізу теплового та напружено-деформованого стану вогнезахищеної сталевій балки та провести оцінювання вогнестійкості в програмному комплексі «ЛІРА-САПР».

### 4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом випробування були обрані 2 сталеві балки двотаврового перерізу ІРЕ 400 (зведена товщина 5,309 мм, коефіцієнт перерізу  $A_m/V=188,4 \text{ м}^{-1}$ ), довжиною по 4,7 м, які перед нанесенням вогнезахисної речовини були покриті шаром ґрунту ГФ-021 товщиною 0,05 мм. Товщина вогнезахисного покриття для зразка балки № 14 складала 0,215 мм, для зразка балки № 15 – 1,173 мм.

Навантаження на балку було здійснено 2 блоками по 730 кг та 264 кг по всій балці в місцях. Розташування термопар на зразках здійснювалось згідно з ДСТУ Б В.1.1-13: 2007. Експерименти проводили при температурі повітря 27 °С, відносній вологості повітря 54 %. В результаті проведення випробувань на вогнестійкість вогнезахищених сталевих балок отримано залежність середніх температур зразків навантажених сталевих балок з реактивним вогнезахисним покриттям мінімальної та максимальної товщини від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі.

Знайдені температури в печі та середні температури вогнезахищених навантажених сталевих балок в подальшому використовуються для оцінювання вогнестійкості за допомогою розроблених комп'ютерних моделей.

Розрахунки були виконані на ліцензованій комп'ютерній програмі, яку надає ТОВ «ЛІРА САПР» (Україна) (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

### 5. Розробка структурно-логічної схеми забезпечення вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій

На рис. 1 представлено керуючий алгоритм та процедуру реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій, який засновано на експериментальних (блок випробування) та розрахункових (блок моделювання) процедурах. Експериментальна частина включає проведення випробувань на вогнестійкість як сталевих конструкцій, так і зразків зменшених розмірів, вибір проектного сценарію пожежі, умов спірання, термопари (кількість, місця встановлення), вид вогнезахисного покриття (реактивне, пасивне), навантаження, деформація зразка. Розрахункова частина включає комп'ютерну реалізацію розробленої математичної моделі, побудову скінчено-елементної моделі, в якій враховано геометрію, теплофізичні та механічні властивості матеріалів конструкції, моделювання процесу (теплотехнічний та статичний аналізи) та виконання умов забезпечення вогнестійкості конструкцій.

Згідно вказаного алгоритму було проведено оцінку ефективності та процедуру реалізації методу при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій, що представлено нижче.

## 6. Розробка скінченно-елементної моделі та оцінювання вогнестійкості вогнезахисної сталеві балки

За експериментальними значеннями середньої температури балок та за стандартною температурною кривою було здійснено розрахунок деформацій вогнезахисної балки. Для визначення меж вогнестійкості балочних конструкцій за умови настання граничного стану з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності необхідно виконати теплотехнічне і статичне моделювання. У програмному комплексі «ЛІРА-САПР» було проведено скінченно-елементний аналіз розглянутої вогнезахисної сталеві балки. Розрахунок проводився із врахуванням фізичної нелінійності. Була побудована комп'ютерна модель напружено-деформованого стану вогнезахисної сталеві балки (рис. 2).

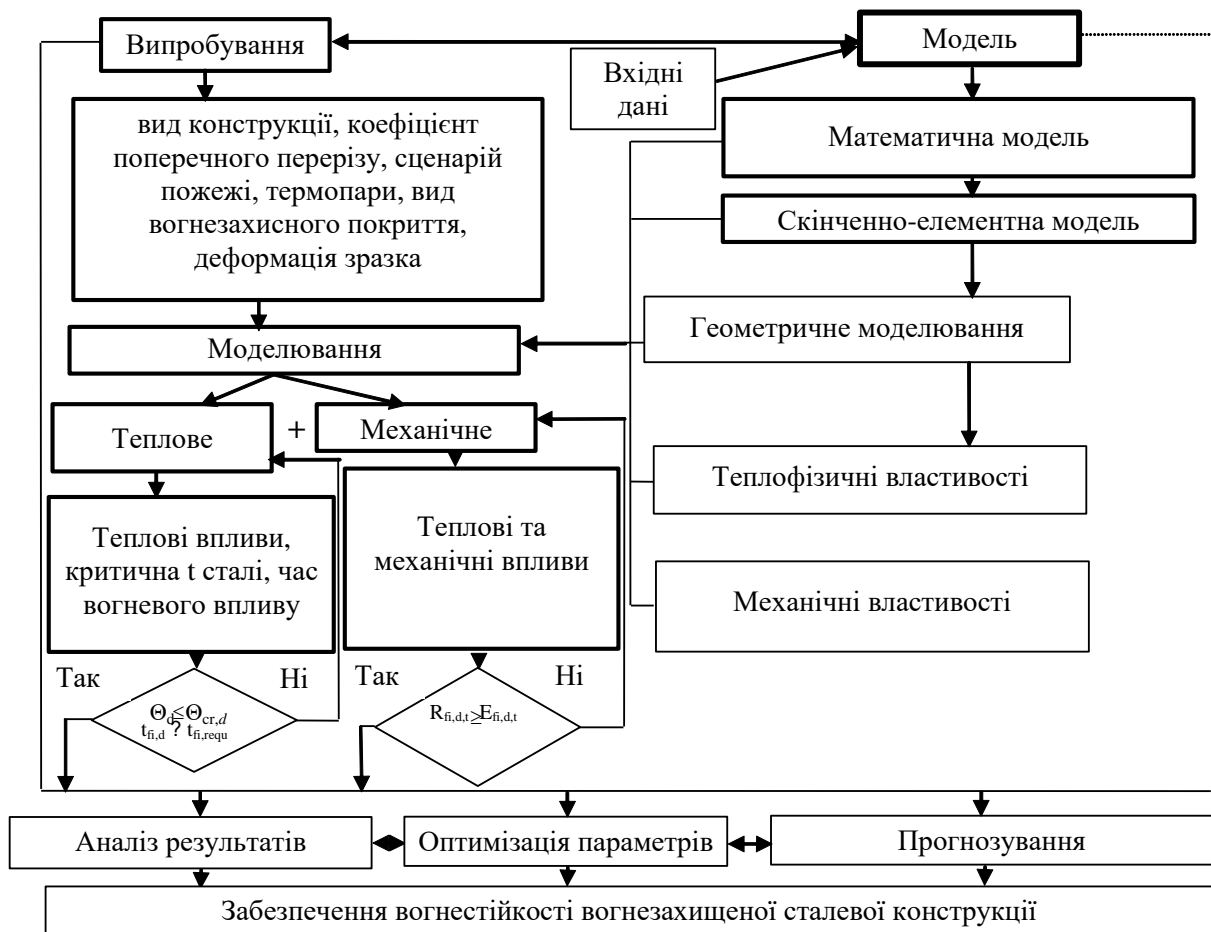


Рис. 1. Керуючий алгоритм та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій

Модель складається з 58231 та 41732 елементів. Крок розбиття по перерізу склав  $h=0,01$  м, часовий крок  $\Delta t=60$  с.

Теплофізичні характеристики досліджуваного реактивного вогнезахисного покриття для їх використання в розрахунках нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві балки були визначені в попередніх роботах [12].

Для розв'язання задач був обраний продукт ЛІРА-САПР, за допомогою якого визначали розподіл температурних полів вирішенням теплотехнічної задачі. Статичний розрахунок виконувався із залученням відомих методик, що враховують вид завантаження конструкції.

Для розрахунку моделі в програмі використовувався метод скінчених

елементів, де створювалася твердотільна об'ємна (скінченими елементами) геометрія, яка в подальшому розбивалася на скінчені елементи у вигляді сітки. Сітка мала вузли, в кожному з яких у часі розраховувалася температура. Внаслідок цих розрахунків будувалися графіки розрахункових залежностей.

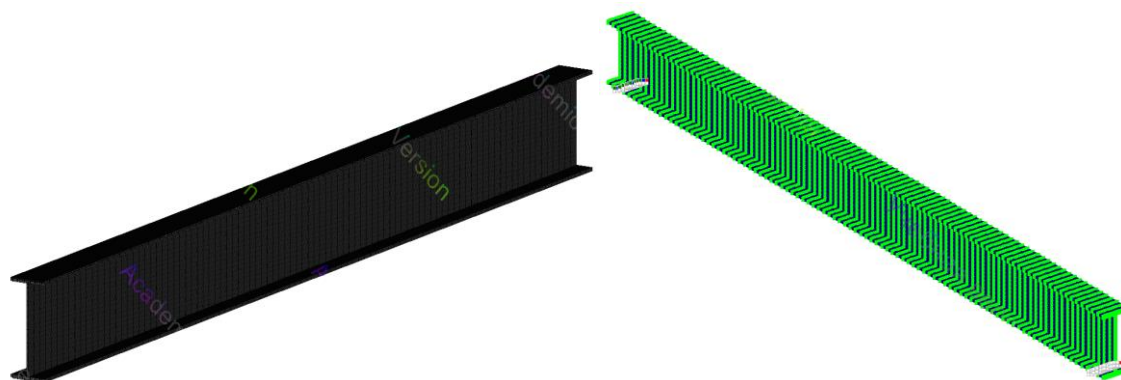


Рис. 2. Комп'ютерна модель напружено-деформованого стану вогнезахисної сталеві балки

Розрахункова схема розглянутої задачі представлена на рис. 3.

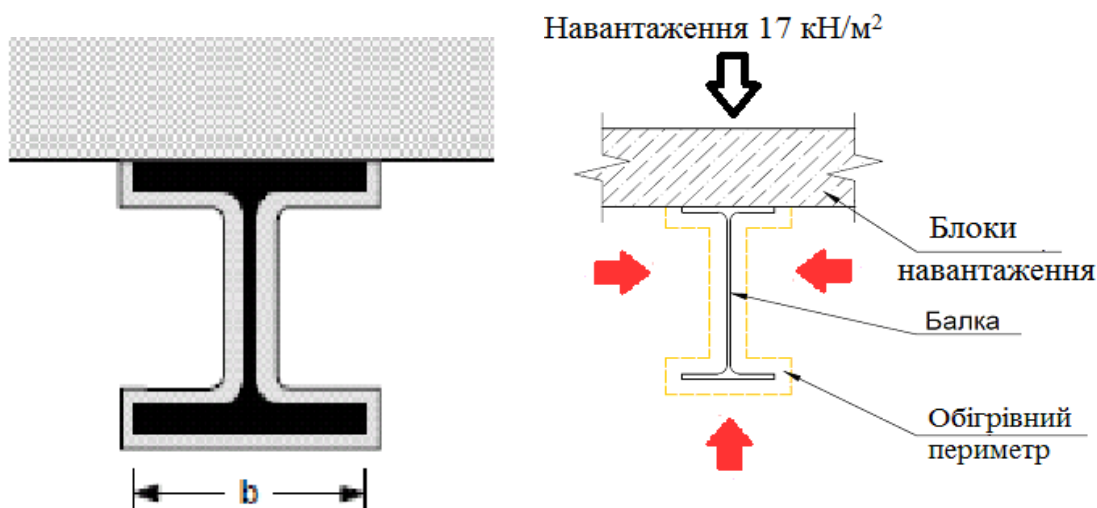


Рис. 3. Розрахункова схема вогнезахисної балки

Результатом моделювання прогріву балки в умовах обігріву її газовим середовищем в умовах випробування при стандартному температурному режимі пожежі є ізополя розподілу температур по перетину балки (рис. 4).

На підставі отриманих розподілів температур по перерізу елемента можна зробити висновок, що верхня і нижня полки двотавра, а також стінка двотавра, досягають критичних температур практично одночасно, що тягне за собою швидке руйнування конструкції в силу втрати стійкості балкою.

За результатами проведених розрахунків температури сталі для часу  $t_{fi,requ}=60$  хв за різних товщин покриття визначено, що значення мінімальної товщини  $d_{pmin}$  вогнезахисного покриття, за якого для сталеві балки з коефіцієнтом перерізу  $A_p/V=188,4 \text{ м}^{-1}$  забезпечується нормована вогнестійкість R 60, становить 0,215 мм.

Наступним етапом було моделювання напружено-деформованого стану вогнезахисної сталеві балки. Для цього в програмному комплексі ЛІРА-САПР була побудована модель та прикладені навантаження і власна вага балки.

При моделюванні напружено-деформованого стану навантаженої вогнезахисної сталевий балки використано діаграму «напруження-деформація» та коефіцієнту зниження для вуглецевої сталі за підвищеної температури [12].

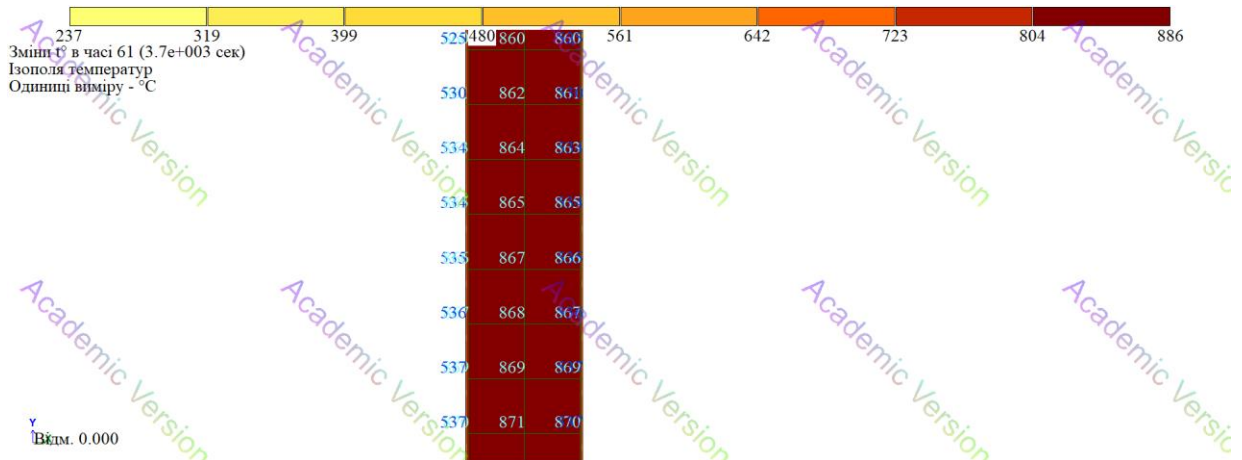


Рис. 4. Розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття на 61 хв випробування

На рис. 5 зображено результати статичного розрахунку в ЛІРІ-САПР.

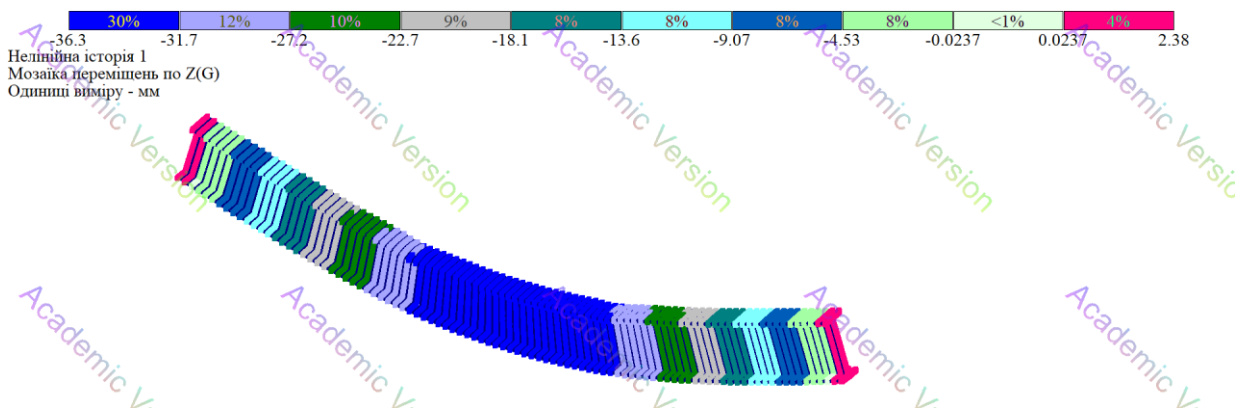


Рис. 5. Прогин навантаженої вогнезахисної сталевий балки

Як видно із рис. 5 прогин навантаженої вогнезахисної сталевий балки в середній частині плити в кінці розрахунку складає 25,5 мм, що задовільно корелює з експериментальними результатами (25 мм), а похибка не перевищує 3 % (рис. 6).

Виходячи з результатів, зображених на рис. 6, можна констатувати правильність побудови комп'ютерної моделі в програмному середовищі ЛІРА-САПР, правильність задавання параметрів, початкових та граничних умов. Для доведення цього твердження достатньо дослідити характер кривих зміни значень прогину навантаженої вогнезахисної сталевий балки по середині прольоту від часу вогневого впливу згідно стандартного температурного режиму пожежі (рис. 6).

Як зображено на рис. 6 найбільша область відхилення у значеннях прогину спостерігається на 50 хвилині розрахунку і становить близько 1,7 мм, що складає 3 %. Це означає, що врахування всіх параметрів при побудові комп'ютерної моделі теплових процесів та напружено-деформованого стану в системі «навантажена сталевий балка – вогнезахисне покриття» відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

## 7. Обговорення результатів оцінювання вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття

Мета роботи вирішувалась шляхом оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталевий балки за допомогою розробленої комп'ютерної моделі напружено-деформованого стану балки в програмному забезпеченні «ЛІРА-САПР» для підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд. Отримані в результаті теплового (рис. 4) та статичного моделювання (рис. 5) результати дозволяють визначити значення прогинів сталевих балок по середині прольоту від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Отримані розрахункові результати прогину вогнезахищеної сталевий балки посередині прольоту задовільно корелюють з експериментальними даними, що підтверджує ефективність розробленої моделі. Максимальне значення відхилення прогину спостерігається на 50 хв розрахунку і становить близько 1,7 мм, що складає похибку в 3 %. Підтвердженням цьому є дані (рис. 6), на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень прогину вогнезахищеної сталевий балки. Особливістю розробленої комп'ютерної моделі (рис. 2) становить можливість врахування параметрів моделі, а саме: теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, механічні властивості матеріалів при високотемпературних та силових впливах, схему навантаження (рис. 3). Це, в свою чергу, відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за заданого температурного режиму пожежі.

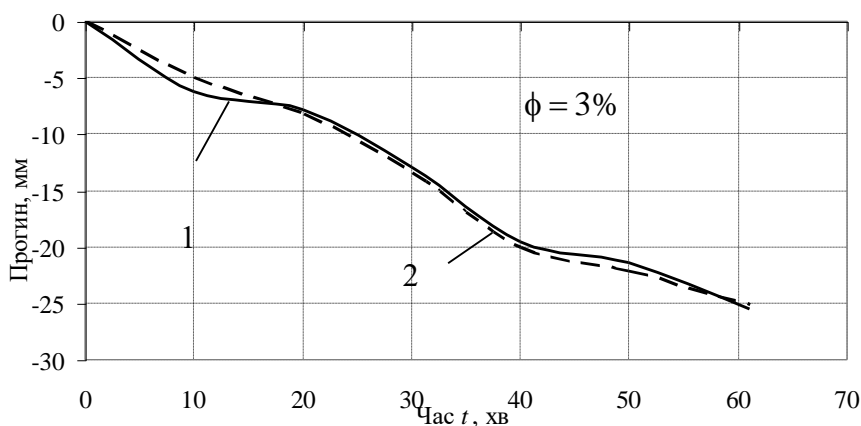


Рис. 6. Прогин навантаженої вогнезахищеної сталевий балки по середині прольоту при впливі стандартного температурного режиму пожежі: 1 – експеримент; 2 – розрахунок в програмному комплексі ЛІРА-САПР

Необхідно зазначити, що недоліком розробленої комп'ютерної моделі є відсутність достовірних даних щодо міцнісних та деформаційних характеристик матеріалу сталевий конструкції та теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів. Це призводить до того, що проектувальники користуються даними, що є в літературі чи нормативних документах. Це не завжди задовольняє вимогам щодо достовірності результатів розрахунків і може призвести до помилкового визначення вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій. Неврахування вказаних параметрів при моделюванні накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки даного дослідження. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує актуальний напрям подальших досліджень. Він може бути орієнтований на розробку Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-20



комп'ютерної моделі конструктивної схеми будівлі з використанням вогнезахисних сталевих конструкцій із обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Розвиток даного дослідження може полягати у розробці універсального методу, який би враховував можливість оцінювання вогнестійкості будівель та споруд при сумісній роботі як сталевих, так і залізобетонних вогнезахисних і незахищених будівельних конструкцій. При цьому є можливість зіткнутися з труднощами опису математичного апарату процесу нестационарного прогріву вогнезахисних сталевих конструкцій та їх напружено-деформованого стану при сумісній роботі в конструктивній схемі будівлі, що полягають в правильній побудові комп'ютерної моделі та задаванні параметрів з науково обґрунтованими характеристиками.

## 8. Висновки

1. За допомогою розроблено розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисної сталеві балки, що працює під навантаженням. Розроблена структурно-логічна схема забезпечення вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій на основі розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. За допомогою методу можливо оцінювати вогнестійкість за допомогою теплотехнічного та статичного аналізу як конструкцій, так і зразків зменшених розмірів.

2. Розроблені комп'ютерні моделі теплового та напружено-деформованого стану для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій, які враховують: теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, механічні властивості матеріалів при високотемпературних та силових впливах. Встановлено, що результати чисельного моделювання за допомогою розроблених комп'ютерних моделей є адекватними при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Доведено, що рівень точності моделювання є достатнім, а найбільша область відхилення у значеннях прогину спостерігається на 50 хв розрахунку і становить близько 1,7 мм, що складає похибку в 3 %.

## Література

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. doi: 10.1108/JSFE-07-2016-0010
2. 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. doi: 10.1016/j.matdes.2011.05.032
3. 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. doi: URL: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150
4. Li G. Q., Han J., Lou G. B., Wang Y. C. Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 98. P. 177–184. doi: 10.1016/j.tws.2015.03.008
5. 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.

6. 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.

7. Džolev I., Radujković A., Cvetkovska M., Lađinović 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.

8. 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. doi: 10.5937/jaes14-8664

9. 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. doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107403

10. Morys M., Häßler D., Krüger S., Schartel B., Hothan S. Beyond the standard time-temperature curve: Assessment of intumescent coatings under standard and deviant temperature curves. Fire Safety Journal. 2020. Vol. 112. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102951

11. 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. doi: 10.18057/ICASS2018.P.164

12. Sadkovyi V., Andronov V., Semkiv O., Kovalov A., Rybka E., Otrosh Yu. et al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021. 180 p. doi: 10.15587/978-617-7319-43-5

*A. Kovalov<sup>1</sup>, PhD, Senior Researcher, Doctoral Studies*

*Y. Otrosh<sup>1</sup>, DSc, Professor, Head of the Department*

*N. Rashkevich<sup>1</sup>, PhD, Lecturer of the Department*

*S. Rudakov<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*V. Tomenko<sup>2</sup>, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*S. Yurchenko<sup>3</sup>, Court Explosive Technician Expert*

<sup>1</sup>*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*Cherkassy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkassy, Ukraine*

<sup>3</sup>*Cherkassy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs in Ukraine, Cherkassy, Ukraine*

## ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF STEEL STRUCTURES TO ENSURE FIRE SAFETY OF FACILITIES

A structural and logical scheme for ensuring the fire resistance of fire-resistant steel structures has been developed on the basis of the proposed mathematical model and the calculation-experimental method of evaluating the fire resistance of fire-resistant steel structures. The mathematical model differs from existing ones in the ability to determine the time to reach the critical temperature of a fire-resistant steel structure depending on the thickness of the fire-resistant coating, duration of fire exposure, fire scenario, given load level, thermophysical characteristics of steel and fire-resistant coating, as well as the possibility of using experimental values when conducting fire resistance tests both steel structures and reduced-size samples, which facilitates the procedure for evaluating fire resistance. It is advisable to use the model when calculating the fire resistance of fire-resistant steel structures as a result of the design of fire protection of steel structures. A computer model of the stress-strain state of a fire-resistant steel beam was developed in the LIRA-SAPR software to increase the level of fire safety of buildings and structures. A static calculation of a fire-resistant steel beam was carried out, as a result of which the stressed-deformed state of the beam was obtained under the combined effect of force and temperature loads. A comparison of the results of numerical modeling with the results of an experimental study of fire resistance was carried out. The accuracy of the developed computer model for evaluating the fire resistance of fire-resistant steel

structures was verified. The parameters of the model are set, namely: thermophysical characteristics of fire-resistant coatings, thermophysical and mechanical properties of the materials that make up the structure, nonlinear laws of deformation of the model materials, strength and deformation properties of materials at high temperature and force effects, which allow with sufficient accuracy for engineering calculations (up to 3 %) to evaluate the fire resistance of fire-resistant steel structures.

**Keywords:** fire-resistant steel structures, fire resistance assessment, numerical modeling, fire-resistant coatings, LIRA-SAPR

## 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. doi: 10.1108/JSFE-07-2016-0010
2. Yew, M. C., Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. doi: 10.1016/j.matdes.2011.05.032
3. 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. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150
4. Li, G. Q., Han, J., Lou, G. B., Wang, Y. C. (2016). Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity. *Thin-Walled Structures*, 98, 177–184. doi: 10.1016/j.tws.2015.03.008
5. Kovalov, A., Otrosh, Y., Chernenko, O., Zhuravskij, M., Anszczak, M. (2021). 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*, 1038 MSF, 514–523.
6. Kovalov, A., Slovinskyi, V., Udianskyi, M., Ponomarenko, I., Anszczak, M. (2020). Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*, 1006 MSF, 3–10.
7. Džolev, I., Radujković, A., Cvetkovska, M., Lađinović, Đ., Radonjanin, V. (2016). Fire analysis of a simply supported steel beam using Opensees and Ansys Workbench. In *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering*, Subotica, 22, 315–322.
8. 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. doi: 10.5937/jaes14-8664
9. 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. doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107403
10. Morys, M., Häßler, D., Krüger, S., Schartel, B., Hothan, S. (2020). Beyond the standard time-temperature curve: Assessment of intumescent coatings under standard and deviant temperature curves. *Fire Safety Journal*, 112. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102951.
11. 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. doi: 10.18057/ICASS2018.P.164
12. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. (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>

Надійшла до редколегії: 03.03.2023

Прийнята до друку: 11.04.2023