

## УДК 614.841.332

*А. І. Ковальов<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник (ORCID 0000-0002-6525-7558)*

*Ю. А. Отрош<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0003-0698-2888)*

*В. І. Томенко<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-7139-9141)*

*О. М. Данілін<sup>2</sup>, к.т.н., нач. каф. (ORCID 0000-0002-4474-7179)*

*Ю. С. Безугла<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0003-4022-2807)*

*К. М. Карпець<sup>2</sup>, к.геогр.н., доцент, провідний науковий співробітник (ORCID 0000-0001-6388-7647)*

<sup>1</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, Україна

<sup>2</sup>Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

## ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ РЕАКТИВНИХ ПОКРИТТІВ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Проведено експериментальні дослідження з визначення температури з необігрівної поверхні сталевих пластин з мінімальним та максимальним значеннями товщини досліджуваного вогнезахисного покриття в умовах їх випробувань за стандартного температурного режиму пожежі. Проаналізовані результати експериментального визначення температури з необігрівної поверхні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі (температура в печі, температура у визначених місцях на поверхні сталевих пластин, поведінка досліджуваного вогнезахисного покриття). Досліджено вплив коефіцієнту тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на необігрівній поверхні сталевій пластині з вогнезахисним покриттям на точність моделювання теплових процесів, що відбуваються при вогневому впливові за стандартного температурного режиму пожежі. Побудовано розрахункову скінчено-елементну модель системи «сталева пластина–вогнезахисне покриття» для моделювання нестационарного прогріву такої системи в програмному комплексі ANSYS. Проведено моделювання нестационарного прогріву системи «сталева пластина – вогнезахисне покриття» з однаковою товщиною (5 мм) та різних товщинах вогнезахисного покриття (0,248 мм та 1,288 мм) при стандартному температурному режимі пожежі в програмному комплексі ANSYS. Проведено порівняння отриманих розрахункових даних (температура з необігрівної поверхні сталевій пластині з вогнезахисним покриттям) з результатами експериментального дослідження прогріву таких пластин при їх випробуваннях у вогневій печі при стандартному температурному режимі пожежі. Зроблено висновок про адекватність побудованої скінчено-елементної моделі в програмному комплексі ANSYS для системи «сталева пластина–вогнезахисне покриття» при моделюванні нестационарного прогріву такої системи.

**Ключові слова:** вогнестійкість, стандартний температурний режим, сталеві конструкції, вогнезахист, вогнезахисна здатність, скінченна модель, програмний комплекс ANSYS

### 1. Вступ

Одним з факторів, на якому ґрунтується пожежна безпека під час проектування, будівництва, розширення, реконструкції, технічного переоснащення, капітального ремонту, зміни функціонального призначення будівель та споруд різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій та їх здатності поширювати вогонь. Нові технології будівництва передбачають широке застосування різноманітних сталевих 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 або системами захисного шару, що передбачається технологією виробництва, так і застосуванням пасивних вогнезахисних речовин. При всіх перевагах застосування сталевих конструкцій в будівництві супроводжується необхідністю їх вогнезахисту для підвищення меж вогнестійкості конструкції. На ринку України вогнезахисні покриття представлені широким спектром, як вітчизняного так і закордонного виробництва, аналіз характеристик та параметрів

яких потребує детального вивчення. Теплофізичні характеристики багатьох покриттів не визначені або мають значення постійних величин, що не завжди дозволяє визначати межу вогнестійкості сталевій конструкції і вогнезахисну здатність покриттів з достатньою точністю. Тому підвищення ефективності оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій шляхом удосконалення логічно-структурних схем розрахунку нестационарного прогріву вогнезахисних сталевих конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питаннями розрахункової оцінки вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій займалася велика кількість учених [1–5]. В [1] наведені результати детальної оцінки методу, який може бути використаний для прогнозування поведінки сталевій конструкції з вогнезахисним покриттям з урахуванням ефективного коефіцієнту теплопровідності при різних умовах випробування (зміна коефіцієнту перерізу сталі, товщина покриття та режим пожежі), проте не наводяться результати порівняння розрахунків, проведених за допомогою розв'язання обернених задач теплопровідності, з результатами моделювання. В [2] представлені результати теоретичних розрахунків вільно обпертої сталевій балки, підданої впливу стандартного температурного режиму пожежі, за допомогою розробленої моделі, створеної в програмному комплексі ANSYS та у відкритому коді програмного забезпечення OpenSEES, проте не приводяться дані щодо розрахунків з вогнезахистом. В [3] авторами розроблено 2 моделі сталевій балки за допомогою програм ANSYS та OpenSEES, які враховують постійне механічне навантаження та вплив температурного режиму пожежі, проте не враховують наявність систем вогнезахисту та їхній вплив на точність моделювання. Автори [4] пропонують використовувати при розрахунках температури вогнезахисних сталевих конструкцій при пожежі постійного значення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття, що спучується, так як це не впливає на точність розрахунків. Проте, як відомо, найбільша точність розрахунків саме при значенні коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття, яке залежить від температури. В [5] представлені результати експериментального дослідження впливу верхнього покриття на вогнестійкість вогнезахисних покриттів, що спучуються, шляхом порівняння температур вогнезахисних сталевих елементів і ефективної теплопровідності вогнезахисних покриттів, що спучуються з верхнім покриттям і без нього. При цьому, результати показують, що у відповідності зі стандартними умовами пожежі верхнє покриття негативно впливає (зниження розширення і підвищення теплопровідності) на покриття, що спучуються, на основі розчинників. Робота [6] описує результати експериментальних випробувань сталевих пластин різних розмірів з водоемульсійним вогнезахисним покриттям, що спрямовані на дослідження його теплових властивостей та співвідношення зміни температури та товщини в умовах випробувань сталевих пластин різної товщини в умовах кривої тліючої пожежі, проте взагалі не наводяться результати експериментальних випробувань при стандартному температурному режимі пожежі. В [7] представлені результати випробування на вогнестійкість незахищених сталевих балок порівняно з простими та вдосконаленими моделями розрахунку наведеними в EN 1993-1-2. Порівняння показує різницю між температурами,

зафіксованими під час випробувань і температурами, розрахованими відповідно до EN 1993-1-2 та температур, розрахованих в аналізі FEM. Проте в цих роботах поза увагою дослідників залишилися питання розробки скінчено-елементної моделі системи «сталеві пластина–вогнезахисне покриття» як основи для моделювання нестационарного прогріву сталевих конструкцій, так як порівняння результатів, отриманих при випробуваннях на вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій з результатами вогневих випробувань сталевих пластин з вогнезахисними покриттями показує близьку схожимість результатів [4]. У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є недосконалість існуючих логічно-структурних схем розрахунку нестационарного прогріву вогнезахисних сталевих пластин. Не всі параметри існуючих логічно-структурних схем дозволяють отримувати результати моделювання з достатньою для інженерних розрахунків точністю як з використанням даних експериментів, так і за результатами чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

В зв'язку з вище зазначеним, невирішеною частиною розглянутої проблеми є удосконалення логічно-структурної схеми з оцінювання вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій з використанням програмного комплексу ANSYS та наукове обґрунтування параметрів математичної та фізичної моделей в системі «сталеві конструкція-вогнезахисне покриття».

### 3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка скінчено-елементної моделі з оцінювання вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій з використанням програмного комплексу ANSYS.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести експериментальні дослідження з визначення температури прогріву вогнезахисних зразків сталевих конструкцій при стандартному температурному режимі пожежі;
- розробити розрахункову скінчено-елементну модель системи «сталеві пластина-вогнезахисне покриття» для моделювання нестационарного прогріву в програмному комплексі ANSYS;
- провести експериментальну перевірку розрахункової скінчено-елементної моделі з оцінювання вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій з використанням програмного комплексу ANSYS.

### 4. Експериментальні дослідження з визначення температури прогріву вогнезахисних зразків сталевих конструкцій

Проведено експерименти з визначення температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з мінімальним та максимальним значенням товщини досліджуваного вогнезахисного покриття в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Експерименти проводили із застосуванням металевих пластин зі сталі Ст. 3 розмірами 500 мм×500 мм×5 мм. Вогнезахисну речовину наносили механізованим способом з середнім значенням мінімальної та максимальної товщини утвореного покриття. Експерименти проводили при температурі повітря 26 °С, відносній вологості повітря 54 % та тискові 743 мм.рт.ст. Температурний режим пожежі визначався за формулою:

$$\Theta_{g,t} = 20 + 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

де  $\Theta_{g,t}$  – температура газового середовища біля конструкції, °C;  $t$  – час, хв.

Для вимірювання температури з необігрівної поверхні сталеві пластини було встановлено 5 термодпар типу ТХА (рис. 1,а) з діаметром дроту 0,5 мм (Т1–Т5), одна термодпара (Т3) у центрі зразка та чотири (Т1, Т2, Т4, Т5) по центру четвертей пластини. Спаї термодпар зачеканені в метал на глибину 2 мм та прикріплені теплоізолювальним матеріалом. Для вимірювання товщини утвореного вогнезахисного покриття використовували товщиномір, яким було здійснено вимірювання в 9 точках (рис. 1,б), середні значення мінімальної та максимальної товщини утвореного покриття склали 0,248 мм та 1,288 мм.

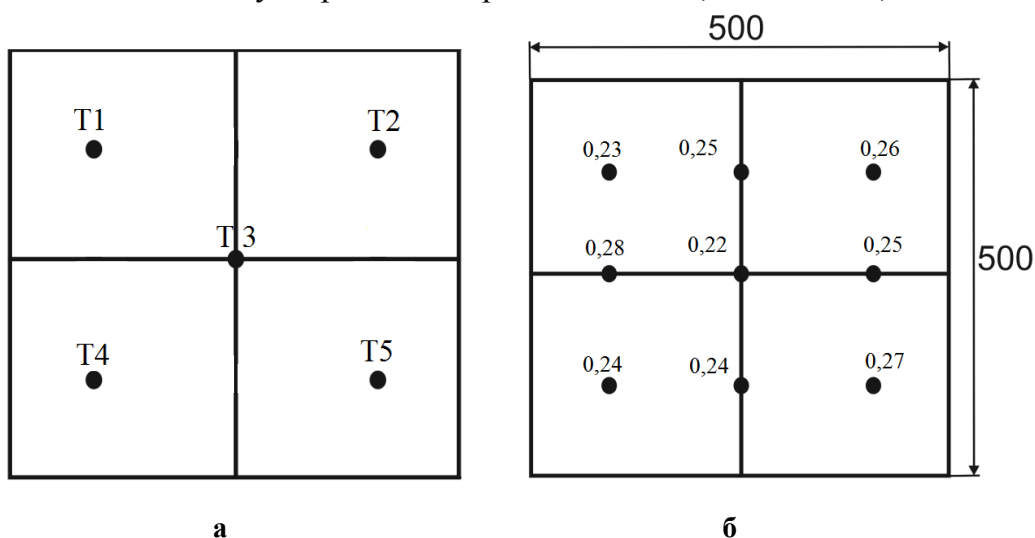


Рис. 1. Схема вимірювання температури (а) та товщина покриття (б) в точках вимірювання для сталеві пластини, товщиною 5 мм з мінімальною товщиною (середня товщина для розрахунків 0,248 мм) вогнезахисного покриття (спучення покриття від 3,2 мм до 4,5 мм)

З необігрівної поверхні пластина була захищена двома шарами мулітокремнеземового фетру, товщиною 20 мм, та плитою мінеральної вати, густиною 75 кг/м<sup>3</sup> і товщиною 50 мм (рис. 2).



Рис. 2. Схема розміщення термодпар (а) та вигляд зразка з необігрівної поверхні сталеві пластини (б), товщиною 5 мм з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття, в точках вимірювання (спучення покриття від 3,2 мм до 4,5 мм)

Суть випробування полягало у створенні стандартного температурного режиму в печі під час теплової дії на дослідний зразок і визначенні часу від

початку теплової дії до настання граничного стану для дослідного зразка [8], коли досягається температура  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  з необігрівної поверхні (рис. 3).

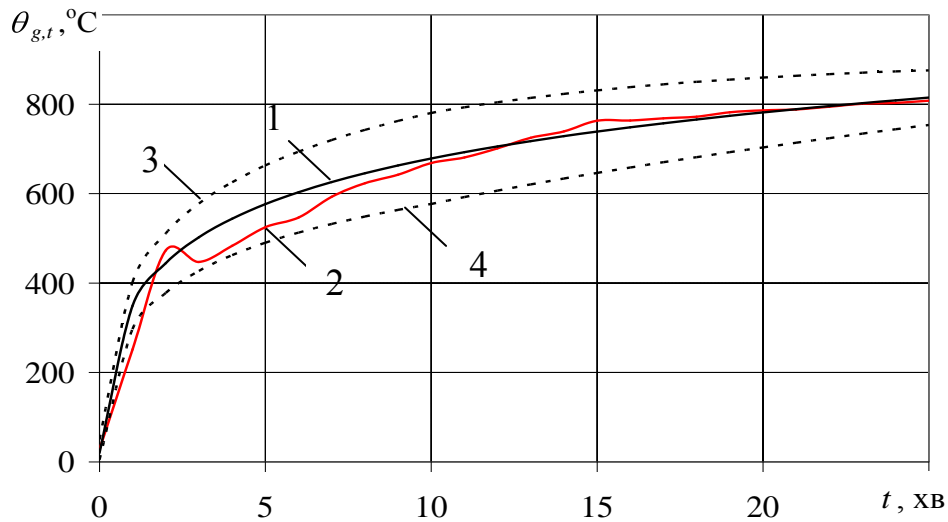


Рис. 3. Залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу при проведенні випробування сталеві пластини з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття: 1 – крива стандартного температурного режиму; крива 2 – реальна крива зміни температури в печі; 3 – допустимі при випробуваннях максимальні значення температури в печі; 4 – допустимі при випробуваннях мінімальні значення температури в печі

Температура з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям при цьому за 25 хв досягла критичної температури сталі  $620\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4).

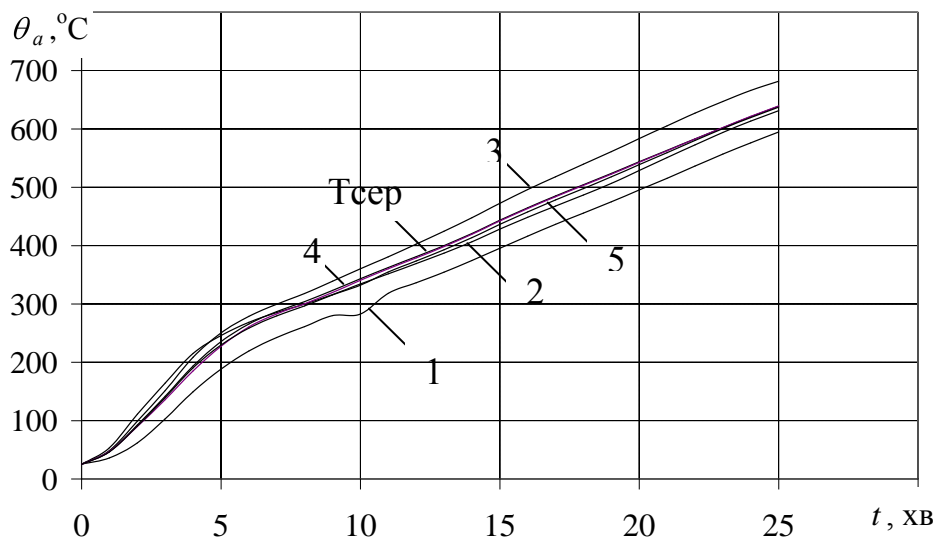


Рис. 4. Залежність температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з мінімальною товщиною досліджуваного вогнезахисного покриття від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі в місцях її вимірювання: 1 – термопара Т1; 2 – термопара Т2; 3 – термопара Т3; 4 – термопара Т4; 5 – термопара Т5; Т сер. – середнє значення показників п'яти термопар

З цими температурами порівнювали результати комп'ютерного моделювання нестационарного прогріву сталеві пластини з вогнезахисним покриттям, виконані за допомогою програмного забезпечення ANSYS.

Вигляд зразків пластин з мінімальною та максимальною товщиною вогнезахисного покриття зображено на рис. 5.



**Рис. 5.** Загальний вигляд зразка сталевієї пластини товщиною 5 мм з вогнезахисним покриттям після випробувань: а – з мінімальним значенням товщини покриття; б – з максимальним значенням товщини покриття

Після випробувань при візуальному огляді зразків встановлено (рис. 5):

- вогнезахисна речовина «Amotherm Steel Wb», нанесена на сталеву пластину, розмірами 500×500×5 мм з ґрунтовкою ГФ-021, має задовільну здатність до зчеплення;

- відшарування утвореного покриття від дослідного зразка за площею не спостерігалось;

- середня товщина спученого шару після випробувань склала 3,85 мм (від 3,2 мм до 4,5 мм) для зразка з мінімальною товщиною утвореного вогнезахисного покриття і 38,5 мм (від 35 мм до 42 мм) для зразка з максимальною товщиною утвореного вогнезахисного покриття.

### **5. Розробка розрахункової скінчено-елементної моделі системи «сталева пластинка–вогнезахисне покриття»**

Теплофізичні характеристики були визначені на основі базової моделі розрахунку методом послідовних ітерацій до отримання збіжності розрахункових і експериментальних даних прогріву дослідних зразків не більше 10 %.

Теплофізичні характеристики досліджуваного вогнезахисного покриття для їх використання в розрахунках нестационарного прогріву вогнезахисної сталевієї пластини були визначені в попередніх роботах [9]: коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури, і постійне значення питомої об'ємної теплоємності  $10^5$  Дж/м<sup>3</sup>·К.

При розв'язанні теплотехнічної задачі визначали залежність температури сталевієї пластини від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі і використовували математичну модель процесу теплопровідності в одновимірній нелінійній постановці, яка описана в [9–10].

Питому теплоємність сталі  $c_a$  (Дж/(кг·К)) та теплопровідність сталі  $\lambda_a$  (Вт/(м·К)) задавали з [11].

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

Модель теплового стану системи «сталева пластинка–вогнезахисне покриття» при пожежі є нестационарною і враховує радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплової дії (вогнища пожежі) до поверхні сталевієї пластини з вогнезахисним покриттям, теплообмін теплопровідністю в

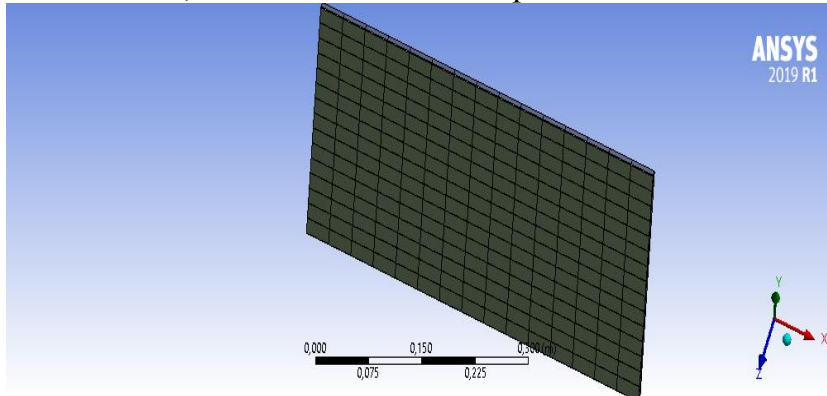


сталевій конструкції та радіаційно-конвективний теплообмін від цієї конструкції в навколишнє середовище з боку необігрівної поверхні.

Розрахунки температури сталі за даною математичною моделлю були виконані із застосуванням чисельного методу розв'язання за неявною кінцево-різницевою схемою апроксимації.

На поверхнях з'єднання пластини і вогнезахисного покриття приймалася умова ідеального теплового контакту.

Комп'ютерна модель створювалася на основі геометричної, фізичної і математичної моделей шляхом генерації розрахункової сітки. На рис. 6 зображено фрагмент сіткової моделі, як частини комп'ютерної моделі.

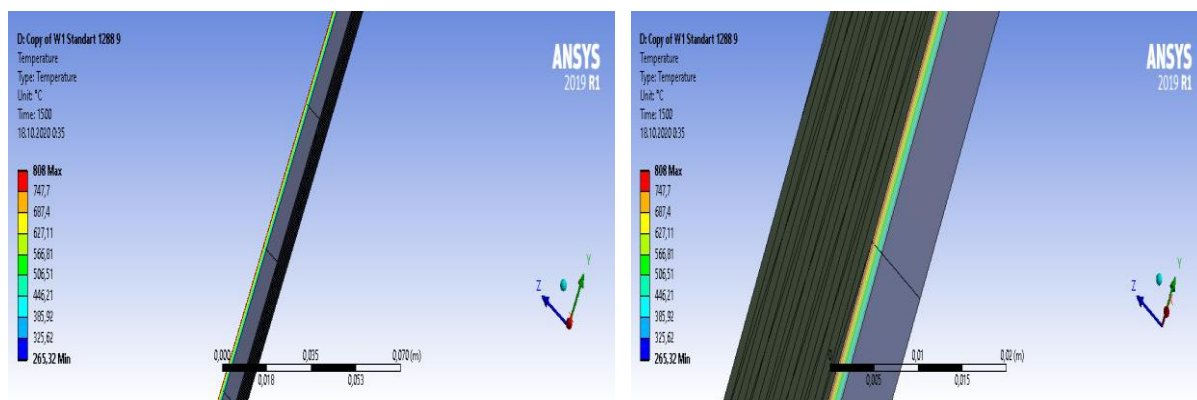


**Рис. 6. Розрахункова скінчено-елементна модель системи «сталева пластина–вогнезахисне покриття»**

Сіткова модель (рис. 6) виконана з необхідним згущенням для урахування особливостей теплообміну в місцях великих температурних градієнтів поблизу поверхні, що піддана впливові пожежі, а також на поверхнях контакту сталеві пластина з вогнезахисним покриттям. Задавалися граничні умови і нелінійні теплофізичні властивості матеріалів.

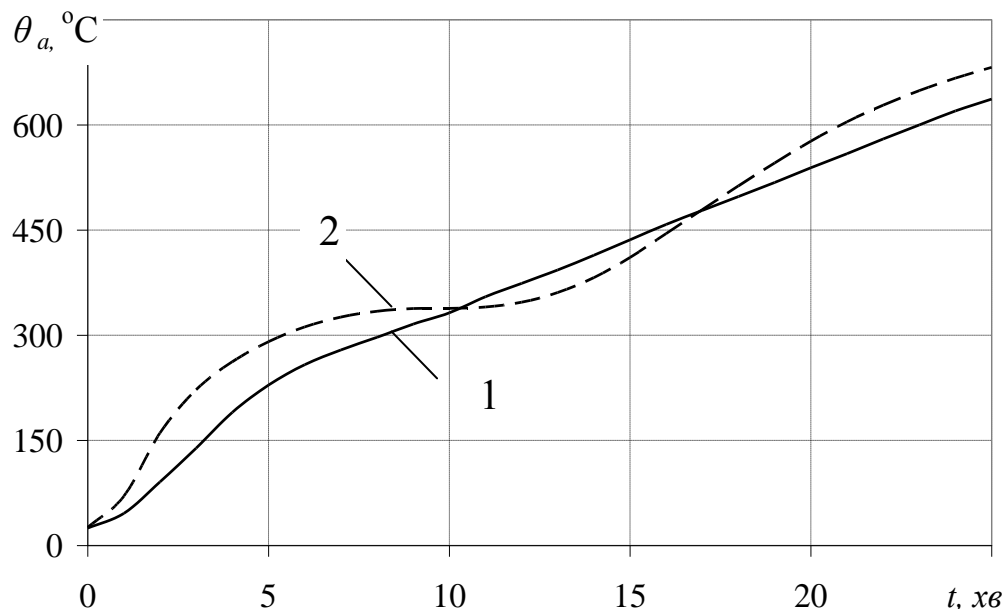
## **6. Експериментальна перевірка розрахункової скінчено-елементної моделі з використанням програмного комплексу ANSYS**

На рис. 7 зображено розрахунки нестационарного прогріву системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття» в програмному комплексі ANSYS з використанням розрахункової скінчено-елементної моделі вказаної системи (рис. 6).



**Рис. 7. Розподіл температури в моделі «сталева пластина-вогнезахисне покриття з максимальною товщиною» після 25 хв. випробувань в умовах стандартного температурного режиму пожежі**

Отримані в результаті чисельного моделювання в програмному середовищі ANSYS температури порівнювали з даними експериментального визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі спочатку для мінімального значення товщини вогнезахисного покриття (0,248 мм), а потім для максимального значення товщини покриття (1,288 мм), а в подальшому і для різних значень коефіцієнту тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на необігрівній поверхні сталеві пластини (5 і 9 (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) (рис. 8–9).



**Рис. 8.** Залежність середньої температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі (мінімальне значення товщини покриття): 1 – отримана експериментальним шляхом; 2 – отримана за допомогою моделювання в ANSYS

Отримані розрахункові дані залежності температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі в програмному комплексі ANSYS, порівняли з результатами експериментального дослідження прогріву таких пластин при їх випробуваннях у вогневій печі при стандартному температурному режимові пожежі. При цьому встановлено задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур, а максимальна похибка розрахунку склала 7 %.

Досліджено вплив коефіцієнту тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям на точність моделювання теплових процесів, що відбуваються при вогневому впливові за стандартного температурного режиму пожежі. Для цього проведено моделювання в програмному середовищі ANSYS нестационарного температурного прогріву сталеві пластини з вогнезахисним покриттям з максимальним значенням товщини покриття 1,288 мм при різних значеннях коефіцієнту тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на необігрівній поверхні сталеві пластини (5 і 9 (Вт/(м<sup>2</sup>·К))). Результати чисельного моделювання представлено на рис. 9.



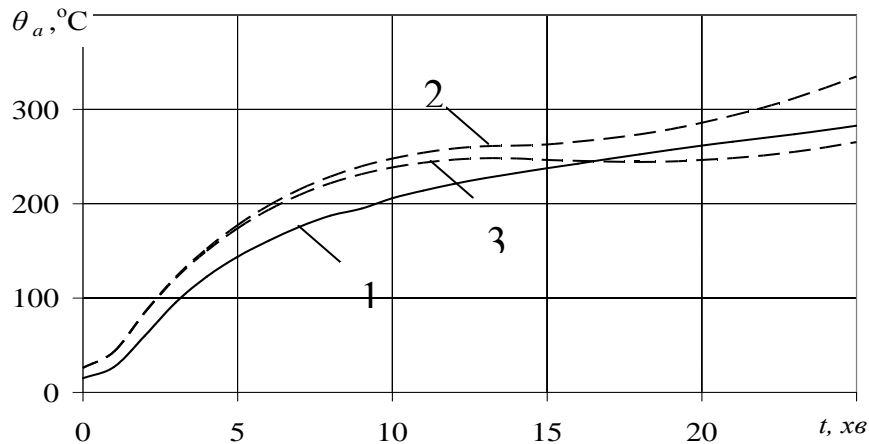


Рис. 9. Залежність середньої температури з необігрівної поверхні сталеві пластина з вогнезахисним покриттям (максимальна товщина) від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – отримана експериментальним шляхом; 2 – отримана за допомогою моделювання в ANSYS (коефіцієнт тепловіддачі на необігрівній поверхні сталеві пластина з покриттям  $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ); 3 – отримана за допомогою моделювання в ANSYS (коефіцієнт тепловіддачі на необігрівній поверхні сталеві пластина з покриттям  $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ )

Як видно із рис. 9, найкраща збіжність результатів комп'ютерного моделювання спостерігається при задаванні такого параметра моделі як коефіцієнт тепловіддачі на необігрівній поверхні сталеві пластина з покриттям рівним  $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . При цьому максимальна похибка розрахунку склала 8 %.

## 7. Обговорення результатів розробки скінчено-елементної моделі системи «сталеві пластина – вогнезахисне покриття»

Мета роботи вирішувалася шляхом обґрунтування параметрів та розробки скінчено-елементної моделі з оцінювання вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій з використанням програмного комплексу ANSYS.

Отримані в результаті виконання роботи результати, а саме: температури прогріву вогнезахисених зразків сталевих конструкцій при стандартному температурному режимі пожежі, а також температури отримані при моделюванні нестационарного прогріву в програмному комплексі ANSYS добре корелюють між собою, мають задовільну збіжність. Це пояснюється використанням відомих математичних моделей теплообміну для системи «сталеві пластина – вогнезахисне покриття», апробованих чисельних методів інтегрування математичних моделей теплообміну і розв'язання обернених задач теплопровідності, а також задовільним збігом розрахункових та експериментальних температур в випробуваних сталевих пластинах. Запропонований підхід на зразках зменшених розмірів дозволяє зменшити працевтрати, збільшити кількість експериментів, які можна провести за короткий час і дозволяє з більшою точністю підходити до питання оцінювання вогнезахисної здатності реактивних покриттів сталевих конструкцій різних типів та профілів. В порівнянні з існуючими підходами (випробування на вогнестійкість конструкції, розрахункове визначення вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій) він має особливості, що полягають у розробці скінчено-елементної моделі системи «сталеві пластина–вогнезахисне покриття» та порівняння отриманих результатів з експериментальними дослідженнями на зразках зменшених розмірів. Даний підхід використовується лише для оцінювання вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій, а

не для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій. Як недолік слід відмітити обмеженість підходу в оцінюванні вогнезахисної здатності покриттів реактивних та пасивних вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій. Це пояснюється тим, що при випробуванні конструкцій обігрів в печі відбувається з трьох або чотирьох сторін, а в розробленій моделі передбачено тільки односторонній нагрів пластини. За допомогою побудованої розрахункової скінчено-елементної моделі можливо проводити розрахунки по визначенню часу досягнення критичної температури сталі пластини і вогнезахисного покриття, яке спучується, різної товщини. В подальшому планується доопрацювання розробленої моделі і адаптація для моделювання нестационарного прогріву сталевих вогнезахисних конструкцій (балок, колон).

Розвиток даного дослідження може полягати у врахуванні в моделі нестационарного прогріву сталевих конструкцій геометричних розмірів, температурних режимів пожежі, граничних та початкових умов, теплофізичних характеристик матеріалу конструкції, вогнезахисних покриттів (коефіцієнт теплопровідності та питому теплоємність вогнезахисного покриття). При цьому можливо зіткнутися з труднощами експериментального характеру, так як випробування на вогнестійкість конструкцій передбачає більшу кількість зразків, а це не завжди є доступним науковій спільноті.

## 8. Висновки

Сплановані та проведені вогневі експерименти по визначенню температури з необігрівної поверхні сталеві пластини (5 мм) з мінімальним (0,248 мм) та максимальним (1,288 мм) значенням товщини досліджуваного вогнезахисного покриття в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі.

Розроблено розрахункову скінчено-елементну модель системи «сталеві пластина–вогнезахисне покриття» для моделювання нестационарного прогріву такої системи в програмному комплексі ANSYS, за допомогою якої проведено розрахунки теплового стану сталеві пластини з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття 0,248 мм та встановлено задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур, а максимальна похибка розрахунку склала 7 %. Використання розробленої скінчено-елементної моделі системи «сталеві пластина–вогнезахисне покриття» дозволить в подальшому проводити розрахунки нестационарного прогріву сталевих конструкцій інших типів в діапазоні приведених товщин, коефіцієнтів перерізу, проектних температур та класів вогнестійкості в програмному комплексі ANSYS з достатньою для інженерних розрахунків точністю (до 10 %).

Проведено верифікацію результатів чисельного моделювання нестационарного прогріву системи «сталеві пластина – вогнезахисне покриття» з максимальною товщиною вогнезахисного покриття 1,288 мм в програмному комплексі ANSYS реальним експериментам та встановлено, що результати експериментальних досліджень і чисельного аналізу в програмі ANSYS позитивно корелюють між собою в межах допустимої похибки, яка становить не більше 8 %.

## Література

1. Burak Kaan Cırpıcı, Y. C. Wang, B. Rogers. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire // Fire Safety Journal. 2016. 81. P. 74–84.
2. Džolev I., Cvetkovska M., Radonjanin V., Ladinović Đ., Laban M. Modelling approach of structural fire performance, 1 st International Symposium Students For Resilient Civil Security. DOI: 10.5281/zenodo.4400152

silient Society, Novi Sad, September 28–29 2018. P. 17–24.

3. Džolev I. et al. Fire analysis of a simply supported steel beam using Opensees and Ansys Workbench // 4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica. 2016. Vol. 22. P. 315–322.

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. 98. P. 177–184.

5. Xu Q., Li G.-Q., Jiang J., Wang Y. C. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures // Fire Safety Journal. 2018. 101. P. 25–38.

6. De Silva D., Bilotta A., Nigro E. Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating // Construction and Building Materials. 2019. 205. P. 232–244.

7. Łukomski M., Turkowski P., Roszkowski P., Papis B. Fire resistance of unprotected steel beams – comparison between fire tests and calculation models // Procedia Engineering. 2017. 172. P. 665–672.

8. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O., Maladyka L. Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fireprotective capability of materials // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2019. 2/10 (98). P. 35–42.

9. Kovalov A., Otrosh Y., Vedula S., Danilin O., Kovalevska T. Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2019. 3. P. 46–53.

10. Kovalov A., Slovinskyi V., Udianskyi M., Ponomarenko I., Anszczak M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method // Materials Science Forum. 2020. 1006 MSF. P. 3–10.

11. ENV 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design.

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

*Y. Otrosh<sup>2</sup>, PhD, Associate Professor, Head of Department*

*V. Tomenko<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*O. Danilin<sup>2</sup>, PhD, Head of Department*

*Y. Bezuhla<sup>2</sup>, PhD, Lecturer of the Department*

*K. Karpets<sup>2</sup>, PhD, Associate Professor, Leading Researcher*

<sup>1</sup>*Cherkassy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkassy, Ukraine*

<sup>2</sup>*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

## ESTIMATION OF THE FIRE-PROTECTIVE CAPACITY OF REACTIVE COATINGS OF STEEL STRUCTURES

Experimental studies have been carried out to determine the temperature on the unheated surface of steel plates with the minimum and maximum values of the thickness of the investigated fire retardant coating under the conditions of their tests at a standard temperature regime of fire. The results of experimental determination of temperature from an unheated surface of steel plates with a fire retardant coating under fire conditions at a standard temperature regime of fire (temperature in the furnace, temperature in certain places on the surface of steel plates, behavior of the investigated fire retardant coating) are analyzed. The influence of the coefficient of heat transfer by convection and thermal radiation on an unheated surface of a steel plate with a fire retardant coating on the accuracy of modeling thermal processes occurring under fire exposure at a standard temperature regime of a fire is investigated. A computational finite element model of the “steel plate-fire protection coating” system has been built to simulate the non-stationary heating of such a system in the ANSYS software package. Simulation of non-stationary heating of the system “steel plate – fire retardant coating” with the same thickness (5 mm) and different thicknesses of the fire retardant coating (0.248 mm and 1.288 mm) at a standard temperature regime of fire in the ANSYS software package has been carried out. Comparison of the calculated data obtained (temperature from the unheated surface of a steel plate with a fire retardant coating) with the results of an experimental study of the heating of such plates during their

tests in a fired furnace at a standard temperature regime of fire is carried out. An experimental verification of the calculated finite-element model for assessing the fire-retardant ability of coatings of steel structures using the software package ANSYS. The results of numerical simulation of non-stationary heating of the system "steel plate-fire-retardant coating" with a maximum thickness of fire-retardant coating of 1.888 mm in the ANSYS software package were verified by real experiments and found that the results of experimental studies and numerical analysis in ANSYS program are positively correlated, which is not more than 8%. A conclusion is made about the adequacy of the constructed finite element model in the ANSYS software package for the "steel plate-fire protection coating" system when simulating non-stationary heating of such a system.

**Keywords:** fire resistance, flame retardant coating, steel structures, fire retardance, fire protection ability, finite model, ANSYS software package

## References

1. Cirpici, B. K., Wang, Y. C., & Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74–84.
2. Džolev, I., Cvetkovska, M., Radonjanin, V., Lađinović, Đ., & Laban, M. Modelling approach of structural fire performance. In book of proceedings, 17.
3. Džolev, I., Radujković, A., Cvetkovska, M., Lađinović, 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, 22, 315–322.
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.
5. Xu, Q., Li, G. Q., Jiang, J., & Wang, Y. C. (2018). Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures. *Fire Safety Journal*, 101, 25–38.
6. de Silva, D., Bilotta, A., & Nigro, E. (2019). Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials*, 205, 232–244.
7. Łukomski, M., Turkowski, P., Roszkowski, P., & Papis, B. (2017). Fire resistance of unprotected steel beams—comparison between fire tests and calculation models. *Procedia Engineering*, 172, 665–672.
8. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O., & Maladyka, L. (2019). Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fire-protective capability of materials. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2(10), 35–42.
9. Kovalov, A., Otrosh, Y., Vedula, S., Danilin, O., & Kovalevska, T. (2019). Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 46–53.
10. 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, 3–10). Trans Tech Publications Ltd.
11. Code, P. (2007). *Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design*. London: European Committee for Standardisation.

Надійшла до редколегії: 06.04.2020

Прийнята до друку: 21.04.2020