

УДК 614.841.45

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СТАЛЕВИХ ПЛАСТИН З ВОГНЕЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ В УМОВАХ ВОГНЕВОГО ВПЛИВУ ЗА СТАНДАРТНИМ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ПОЖЕЖІ

С.В. Новак*, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.
Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 14.11.2016
Пройшла рецензування: 08.12.2016

КЛЮЧОВІ СЛОВА

вогнезахисне покриття, вогнестійкість, зведена товщина сталевих профілю, критична температура сталі, сталева конструкція, стандартний температурний режим пожежі, теплофізичні характеристики.

АНОТАЦІЯ

Наведено постановку задачі, метод та результати розрахунку значень часу досягнення критичної температури сталі для зразків сталевих конструкцій, які мають різні значення зведеної товщини сталевих профілю та товщини вогнезахисних покриттів, в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Встановлено, що експерименти на зразках зменшених розмірів доцільно проводити із застосуванням сталевих пластин, які мають дві товщини (мінімальну 5 мм та максимальну 10 мм), і шару вогнезахисного покриття на них, який має три значення товщини: мінімальне, середнє та максимальне.

Згідно з національним стандартом України ДСТУ Б В.1.1-17 [1] і європейським стандартом ENV 13381-4 [2] для визначення характеристики вогнезахисної здатності покриття (1) проводять випробування певного набору зразків сталевих конструкцій з вогнезахисним покриттям у стандартному температурному режимі. Цей набір, у загальному випадку, містить дві навантажені балки (довжиною 4 м) і дві ненавантажені балки (довжиною 1 м) з вогнезахисним покриттям, а також 10 ненавантажених коротких колон (заввишки 1 м) з вогнезахисним покриттям.

$$d_{P\min} = f\left(\frac{V}{A_p}, \theta_{cr}, t_{fi,requ}\right), \quad (1)$$

де $d_{P\min}$ – мінімальна товщина вогнезахисного покриття, м;

V/A_p – зведена товщина сталевих профілю конструкції, м;

V – об'єм сталевих профілю конструкції, м³;
 A_p – площа поверхні сталевих профілю конструкції, яка піддається вогневому впливу, м;
 θ_{cr} – критична температура сталі, °С;
 $t_{fi,requ}$ – нормована межа вогнестійкості, хв.

У таблиці 1 наведено стандартний набір з 10 коротких колон, із зазначенням параметрів зразків – профільного коефіцієнта перерізу і товщини вогнезахисного покриття. У таблиці 2 для цих колон наведено значення зведеної товщини сталевих профілю і товщини вогнезахисного покриття. У цих випробуваннях на кожному зразку (на поверхні їх металевих частин) встановлюють термометри і визначають залежності температури зразків від часу нагріву.

Таблиця 1 – Стандартний набір з 10 зразків коротких сталевих колон

Типорозміри сталевих профілів	HEM 280	HEB 450	HEB 300	HEA 400	HEA 300	HEA 200	IPE 200
Профільний коефіцієнт перерізу $A_p/V, \text{м}^{-1}$	70	95	116	135	153	212	269
Мінімальна товщина вогнезахисного покриття d_{min}	X		X		X	X	
Середня товщина вогнезахисного покриття d_{med}	X						X
Максимальна товщина вогнезахисного покриття d_{max}		X			X	X	X

Примітка: Позначення "X" вказує на обов'язкові 10 зразків, які повинні бути випробувані.

*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

Таблиця 2 – Значення зведеної товщини сталевого профілю і товщини вогнезахисного покриття для 10 зразків коротких колон зі стандартного набору

№ зразка	Зведена товщина сталевого профілю V/A_p , мм	Товщина вогнезахисного покриття d_p
1	14,29	d_{min}
2	14,29	d_{med}
3	10,53	d_{max}
4	8,621	d_{min}
5	6,536	d_{min}
6	6,536	d_{max}
7	4,717	d_{min}
8	4,717	d_{max}
9	3,717	d_{med}
10	3,717	d_{max}

За отриманими експериментальними даними розраховують коригувальні коефіцієнти, які враховують відмінності у товщині покриття і температурах на зразках навантажених і ненавантажених балок. Відкориговані за допомогою цих коефіцієнтів значення середньої температури сталевого профілю кожного з 10 зразків колон, отримані для різної тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом, використовують як вихідні дані для розрахунку залежності (1), яку представляють у табличній формі. У цій таблиці результати розрахунку мінімальної товщини вогнезахисного покриття наводять для значень критичної температури сталі 350 °C, 400 °C, 450°C, 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C, 700 °C, 750 °C та зведеної товщини сталевого профілю від 2,5 мм до 25 мм.

Для ефективної реалізації зазначеного вище методу визначення залежності (1) важливо мати точні дані про значення мінімальної d_{min} і максимальної d_{max} товщини вогнезахисного покриття, які повинні бути при випробуваннях. Помилка у завданні цих значень може призвести до отримання даних щодо вогнезахисної здатності покриття не для всього діапазону нормованої межі вогнестійкості та критичної температури сталі, що у свою чергу, у ряді випадків, викличе необхідність проведення повторних випробувань. Зокрема, якщо величину d_{max} або d_{min} занижено, то під час випробувань для тривалості вогневого впливу, яка відповідає нормованій межі вогнестійкості $t_{fi,requ}$, на сталевому елементі зразків може бути не досягнуто температури 750 °C, що вимагається умовами проведення випробувань, наведеними в [1, 2]. Застосування завищеного значення d_{max} може призвести до отримання невірних результатів випробувань через погіршення здатності вогнезахисного покриття до злипання (зчеплення) з металевою

поверхнею зразків за такої завищеної його товщини.

З огляду на значні трудомісткість і матеріальні витрати, які мають місце при реалізації вищезазначеного стандартизованого методу, є доцільним попередньо проводити експериментальне визначення значень температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям для різної тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі на зразках зменшених розмірів [3], за результатами якого встановлювати мінімальну d_{min} і максимальну d_{max} товщини вогнезахисного покриття. У методиці проведення цих експериментів невирішеним є питання щодо параметрів зразків. Тому метою даних розрахункових досліджень було визначення мінімальної кількості і товщини сталевих пластин, а також значень товщини вогнезахисного покриття, які необхідно застосовувати під час проведення експериментів на зразках зменшених розмірів.

Метод розв'язання задачі та результати розрахунків

Для розв'язання поставленої задачі застосовано метод, заснований на проведенні обчислювального експерименту, що імітує випробування в вогневої печі зразків захищених сталевих конструкцій шляхом розв'язання теплотехнічної задачі. При розв'язанні теплотехнічної задачі визначали залежність температури сталі від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом і використовували математичну модель процесу теплопровідності в одновимірній нелінійній постановці, яка містить такі рівняння:

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right), \quad (2)$$

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

– початкова умова: $\theta_p(x, 0) = \theta_0$, (3)

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

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \alpha^* (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (4)$$

де $\alpha^* = \alpha_c + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] / (\theta_{g,t} - \theta_m)$, (5)

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

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = c_a \rho_a \frac{V}{A_p} \frac{\partial \theta_p}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\theta_a(t) = \theta_p(0, t), \quad (7)$$

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

t – час, с;

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

α_c – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні покриття,

$$\alpha_c = 25 \text{ Вт/(м·К)};$$

α^* – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на обігрівній поверхні покриття, Вт/(м·К);

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,

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4\text{)};$$

θ_a – температура сталі, °С;

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

θ_m – температура обігрівної поверхні покриття, °С;

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

θ_p – температура покриття, °С;

λ_p – теплопровідність покриття, Вт/(м·К);

c_a – питома теплоємність сталі відповідно до [4], Дж/(кг·К);

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

ρ_p – густина покриття, кг/м³;

ρ_a – густина сталі, $\rho_a = 7850$ кг/м³[4].

Розрахунки проводили для 10 зразків, параметри яких визначали, виходячи з даних таблиці 2 і максимальної тривалості вогневого впливу 240 хв, і розглядали два такі варіанти зміни теплофізичних характеристик (далі – ТФХ) вогнезахисного покриття:

– постійні малі значення ТФХ: теплопровідність $\lambda_p = 0,03$ Вт/(м·К), питома об'ємна теплоємність $c_p \rho_p = 3 \cdot 10^4$ Дж/(м³·К);

– постійні великі значення ТФХ: теплопровідність $\lambda_p = 0,3$ Вт/(м·К), питома об'ємна теплоємність $c_p \rho_p = 3 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К).

Наведені значення ТФХ покриттів обрані, виходячи з можливого діапазону їх зміни. Зокрема малі ТФХ мають реактивні вогнезахисні покриття, які значно збільшують свою товщину (у десятки разів) під час вогневого впливу. Великі ТФХ мають вогнезахисні покриття, які мають значну густину (наприклад, покриття з бетону).

Теплотехнічну задачу розв'язували методом кінцевих різниць з використанням неявної схеми апроксимації [5]. У таблицях 3 і 4 наведені параметри зразків, які були використані при проведенні обчислювального експерименту для вищенаведених варіантів зміни ТФХ.

Таблиця 3 – Параметри зразків для проведення обчислювального експерименту при таких значеннях ТФХ вогнезахисного покриття: $\lambda_p = 0,03$ Вт/(м·К), $c_p \rho_p = 3 \cdot 10^4$ Дж/(м³·К)

№ зразка	Зведена товщина сталевого профілю V/A_p , мм	Товщина вогнезахисного покриття d_p , мм
1	14,29	2,141
2	14,29	3,051
3	10,53	3,961
4	8,621	2,141
5	6,536	2,141
6	6,536	3,961
7	4,717	2,141
8	4,717	3,961
9	3,717	3,051
10	3,717	3,961

Таблиця 4 – Параметри зразків для проведення обчислювального експерименту при таких значеннях ТФХ вогнезахисного покриття: $\lambda_p = 0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $c_p\rho_p = 3 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К)}$

№ зразка	Зведена товщина сталевого профілю V/A_p , мм	Товщина вогнезахисного покриття d_p , мм
1	14,29	17,67
2	14,29	22,09
3	10,53	26,51
4	8,621	17,67
5	6,536	17,67
6	6,536	26,51
7	4,717	17,67
8	4,717	26,51
9	3,717	22,09
10	3,717	26,51

У таблицях 5 і 6 наведені розрахункові значення часу досягнення критичної температури сталі для зразків № 1 – № 10, отримані для розглянутих варіантів зміни ТФХ вогнезахисного покриття.

З аналізу отриманих розрахункових даних випливає, що на інтенсивність прогріву зразків (на значення часу досягнення критичної температури) значно впливає як зведена товщина сталевого профілю, так і товщина вогнезахисного покриття. Наприклад, для варіанта з малими ТФХ при однаковій товщині вогнезахисного покриття 2,141 мм (зразки № 1, 4, 5, 7, див. таблицю 5 і рис. 3) значення часу t_{500}

досягнення критичної температури сталі 500 °С змінюється від 31,75 хв (зразок № 7, зведена товщина 4,717 мм) до 71,80 хв (зразок № 1, зведена товщина 14,29 мм) і максимальна відмінність у цьому часі становить 55,8%. Для варіанта з великими ТФХ і тих же зразків (товщина вогнезахисного покриття 17,67 мм) значення часу досягнення критичної температури сталі 500 °С змінюється від 55,00 хв (зразок № 7, зведена товщина 4,717 мм) до 86,77 хв (зразок № 1, зведена товщина 14,29 мм) і максимальна відмінність у часі досягнення критичної температури сталі 500 °С становить 36,6%, що трохи нижче, ніж для варіанта з малими ТФХ.

 Таблиця 5 – Розрахункові значення часу досягнення критичної температури сталі, отримані розв'язанням теплотехнічної задачі при таких значеннях ТФХ вогнезахисного покриття: $\lambda_p = 0,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $c_p\rho_p = 3 \cdot 10^4 \text{ Дж}$

Критична температура θ_{cr} , °С	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Розрахункове значення часу досягнення критичної температури, хв								
1	44,53	52,70	61,72	71,80	83,23	96,42	111,68	130,63	181,72
2	58,35	69,17	81,12	94,47	109,62	127,07	147,25	172,32	240,00
3	56,43	67,05	78,82	92,02	107,12	124,62	144,98	170,55	240,00
4	30,30	35,90	42,13	49,13	57,17	66,53	77,50	91,32	128,83
5	24,65	29,23	34,33	40,12	46,78	54,62	63,87	75,63	107,66
6	38,98	46,38	54,63	63,98	74,77	87,38	102,28	121,25	173,12
7	19,40	23,03	27,12	31,75	37,17	43,57	51,22	61,08	88,02
8	30,42	36,23	42,77	50,20	58,85	69,07	81,25	96,95	140,07
9	20,95	24,95	29,45	34,62	40,63	47,82	56,45	67,68	98,50
10	25,42	30,35	35,88	42,20	49,60	58,42	69,02	82,82	120,82

Таблиця 6 – Розрахункові значення часу досягнення критичної температури сталі, отримані розв’язанням теплотехнічної задачі при таких значеннях ТФХ вогнезахисного покриття: $\lambda_p = 0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $c_p \rho_p = 3 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К)}$

Критична температура θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650	700	750
№ зразка	Розрахункове значення часу досягнення критичної температури, хв								
1	58,73	67,23	76,52	86,77	98,25	111,28	126,15	144,23	188,72
2	74,78	85,37	96,87	109,52	123,63	139,60	157,75	179,70	232,72
3	81,88	92,85	104,72	117,75	132,23	148,55	167,00	189,23	240,47
4	47,15	53,63	60,70	68,50	77,25	87,18	98,57	112,43	145,20
5	42,62	48,33	54,55	61,42	69,10	77,83	87,85	100,05	128,05
6	70,12	79,10	88,83	99,47	111,27	124,52	139,52	157,50	196,55
7	38,50	43,52	48,98	55,00	61,73	69,38	78,17	88,85	112,35
8	64,45	72,52	81,23	90,75	101,30	113,12	126,47	142,42	175,38
9	47,92	53,92	60,43	67,57	75,48	84,42	94,55	106,72	131,68
10	61,23	68,78	76,95	85,83	95,68	106,68	119,12	133,90	163,32

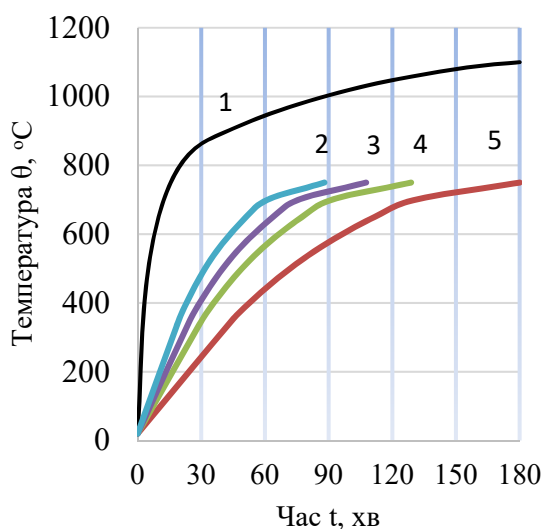


Рисунок 3 – Залежності температури в печі (1) і температури зразків № 1 (5), № 4 (4), № 5 (3) і № 7 (2) від часу вогневого впливу для варіанта з малими ТФХ (товщина вогнезахисного покриття 2,141 мм)

На рис. 4 наведено залежності часу досягнення критичної температури сталі 500 °C від зведеної товщини сталевго профілю при товщині вогнезахисного покриття 2,141 мм (варіант з малими ТФХ) і 17,67 мм (варіант з великими ТФХ). З аналізу отриманих розрахункових даних можна зробити висновок про лінійну залежність часу досягнення критичної температури сталі від зведеної товщини сталевго профілю при однаковій товщині вогнезахисного покриття.

При однаковій зведеній товщині сталевго профілю максимальна відмінність у часі досягнення критичної температури сталі 500 °C для варіанта з малими ТФХ становить 37,3% (зразки № 5 і № 6 зі зведеною товщиною 6,536 мм) і 39,4% для варіанта з великими ТФХ (зразки № 7 і № 8 зі зведеною товщиною 4,717 мм). На рис. 5 для зведеної товщини сталевго профілю 4,717 мм (зразки № 7 і № 8) і варіанта з великими ТФХ наведено залежність часу досягнення критичної температури сталі 500 °C від товщини вогнезахисного покриття. Для отримання цієї залежності було проведено додаткові розрахунки значень часу досягнення критичної температури сталі 500 °C при товщинах вогнезахисного покриття, що відрізняються від наведених у таблиці 4. З аналізу отриманих розрахункових даних випливає, що при однаковій зведеній товщині сталевго профілю залежність часу досягнення критичної температури сталі від товщини вогнезахисного покриття є монотонною і має нелінійний характер.

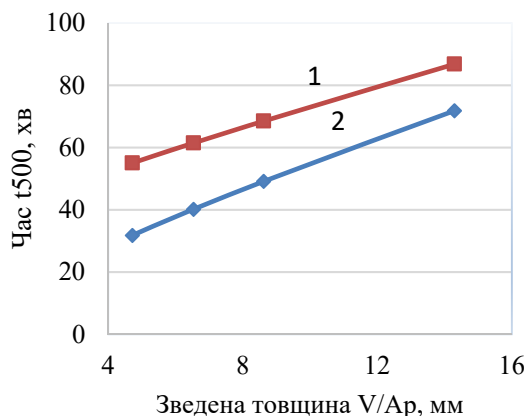


Рисунок 4 – Залежності часу досягнення критичної температури сталі 500 °С від зведеної товщини сталевго профілю:

- 1 – варіант з великими ТФХ, товщина вогнезахисного покриття 2,141 мм;
- 2 – варіант з малими ТФХ, товщина вогнезахисного покриття 17,67 мм

Висновки за результатами розрахункових досліджень. Враховуючи лінійну залежність часу досягнення критичної температури сталі від товщини сталевго профілю і нелінійну залежність цього часу від товщини вогнезахисного покриття, а також необхідність мінімізації кількості зразків для випробувань, експерименти на зразках зменшених розмірів доцільно проводити із застосуванням сталевих пластин, які мають дві товщини (мінімальну та максимальну), і шару вогнезахисного покриття на них, який має три значення товщини: мінімальне, середнє та максимальне. Як мінімальне та максимальне значення товщини сталевих пластин доцільно прийняти 5 мм та 10 мм, з урахуванням величин зведеної товщини сталевго профілю конструкцій, які широко застосовують на практиці при створенні будівельних об'єктів. Значення товщини шару вогнезахисного покриття на сталевих пластинах (мінімальне, середнє та максимальне) залежать від теплофізичних

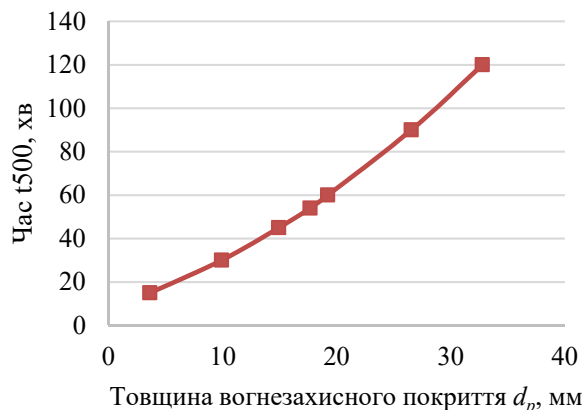


Рисунок 5 – Залежність часу досягнення критичної температури сталі 500 °С від товщини вогнезахисного покриття для зведеної товщини сталевго профілю 4,717 мм і варіанта з великими ТФХ

властивостей вогнезахисного покриття і має бути надано замовником випробувань або визначено за результатами попередніх досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (EN 13381-4:2002, NEQ).
2. ENV 13381-4:2002 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 4: Applied protection to steel members.
3. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання.
4. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1991-1-2:2005, IDT).
5. Круковский П.Г. Обратные задачи тепло-массопереноса (общий инженерный подход). Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998, 224 с.

PARAMETERS REASONING OF SAMPLES FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TEMPERATURE OF THE STEEL PLATES THAT ARE FIRE-RETARDANT COATING IN CONDITIONS OF FIRE EXPOSURE UNDER STANDARD TEMPERATURE FIRE REGIME

*S. Novak, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. St. Sc.
The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine*

KEYWORDS

fire-retardant coating, fire resistance, erected thickness of steel profile, critical temperature of steel, steel construction, standard temperature fire regime, thermal characteristics.

ANNOTATION

It is described the statement of problem, the method and the results of calculating the values of time to reach the critical temperature of steel for steel sample constructions that have different meanings of erected thickness of steel profile and thickness of fire-retardant coatings, in conditions of fire exposure under standard temperature fire regime. It is determined that experiments on samples of reduced size, appropriately carried out with the use of steel plates that have two thickness (minimum 5 mm and maximum 10 mm), and a layer of fire-retardant coatings on them, which has three thicknesses: minimum, medium and maximum.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ОГНЕЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ В УСЛОВИЯХ ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА

*С.В. Новак, канд. техн. наук, ст.научн.сотруд.
Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

огнезащитное покрытие, огнестойкость, возведенная толщина стального профиля, критическая температура стали, стальная конструкция, стандартный температурный режим пожара, теплофизические характеристики.

АННОТАЦИЯ

Приведена постановка задачи, метод и результаты расчета значений времени достижения критической температуры стали для образцов стальных конструкций, имеющих различные значения сводной толщины стального профиля и толщины огнезащитных покрытий, в условиях огневого воздействия при стандартном температурном режиме пожара. Установлено, что эксперименты на образцах уменьшенных размеров целесообразно проводить с применением стальных пластин, которые имеют две толщины (минимальную 5 мм и максимальную 10 мм), и слоя огнезащитного покрытия на них, который имеет три значения толщины: минимальное, среднее и максимальное.