

УДК 614.841.415

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІПСОКАРТОННОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ОБЛИЦЮВАННЯ СТАЛЕВИХ БАЛОК В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

Заїка Н. П.¹

¹Національний університет цивільного захисту України

Анотація: Робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі удосконалення розрахункового методу визначення температурних показників у сталевих балках із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах теплового впливу пожежі, необхідний для оцінювання вогнестійкості таких балок. У результаті проведених досліджень одержано дані про теплові характеристики гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок, що є частиною початкових даних для здійснення теплового розрахунку.

Основною теплотехнічною характеристикою гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, що вивчалася була температурна залежність його коефіцієнту теплопровідності при сталих значеннях густини і теплоємності. Дана залежність визначена на основі даних температурних вимірювань при вогневих випробуваннях зразків фрагментів сталевих балок.

Для практичної реалізації теплотехнічного розрахунку для оцінювання вогнестійкості сталевої балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням одержана температурна залежність його коефіцієнту теплопровідності була узагальнена і подана у табличній формі. Отримана узагальнена залежність коефіцієнту теплопровідності може бути застосована для гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок для розрахунку температури у даних конструкціях товщиною до 67.5 мм та густини 950 кг/м³.

У статті показано результати дослідження адекватності даних, отриманих за допомогою отриманої залежності. Для цього було проаналізовано критерії прийнятності, що визначаються на основі відносної та абсолютної похибки розрахункових температурних показників. Для аналізу адекватності отриманих даних розраховано значення статистичних критеріїв Кохрена, Стьюдента та Фішера. Показано належну адекватність отриманих розрахункових даних на основі визначеної температурної залежності коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, оскільки проаналізовані статистичні критерії, які були визначені при порівнянні розрахункових та експериментальних даних, не перевищують табличних значень.

Ключові слова: теплофізичні характеристики, коефіцієнт теплопровідності, сталеві балки, гіпсокартонне вогнезахисне облицювання, випробування на вогнестійкість.

RESEARCH ON THE THERMAL PROPERTIES OF GYPSUM PLASTERBOARD CLADDING OF STEEL BEAMS UNDER FIRE CONDITIONS

N. Zaika¹

¹National University of Civil Defence of Ukraine

Abstract: The work is devoted to solving the urgent scientific and technical problem of improving the calculation method for determining temperature indicators in steel beams with gypsum plasterboard fireproof cladding under conditions of thermal impact of fire, necessary for assessing the fire resistance of such beams. As a result of the conducted research, data were obtained on the thermal characteristics of gypsum plasterboard fireproof cladding of steel beams, which are part of the initial data for thermal calculation.

The main thermal characteristic of gypsum plasterboard fireproof cladding that was studied was the temperature dependence of its thermal conductivity coefficient at constant values of density and



heat capacity. This dependence was determined on the basis of temperature measurement data during fire tests of samples of fragments of steel beams.

For the practical implementation of the thermal calculation for assessing the fire resistance of a steel beam with gypsum plasterboard fireproof cladding, the obtained temperature dependence of its thermal conductivity coefficient was summarized and presented in tabular form. The obtained generalized dependence of the thermal conductivity coefficient can be applied for gypsum board fireproof cladding of steel beams to calculate the temperature in these structures with a thickness of up to 67.5 mm and a density of 950 kg/m^3 .

The article shows the results of a study of the adequacy of the data obtained using the obtained dependence. For this purpose, the acceptance criteria were analyzed, which are determined on the basis of the relative and absolute error of the calculated temperature indicators. To analyze the adequacy of the obtained data, the values of the Cochran, Student and Fisher statistical criteria were calculated. The proper adequacy of the obtained calculated data based on the determined temperature dependence of the thermal conductivity coefficient of gypsum board fireproof cladding is shown, since the analyzed statistical criteria, which were determined when comparing the calculated and experimental data, do not exceed the tabular values.

Keywords: fire, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient, steel beams, gypsum plasterboard cladding, fire resistance testing.

1 ВСТУП

Сталеві балки є широко застосовною у сучасному будівництві конструктивними елементами. При цьому, широкого використання зазнали сталеві балки у каркасах будівель швидкого споруджування. Це будівлі промислових та сільськогосподарських об'єктів (технологічні цехи, склади та сховища, елеватори та зерносховища, теплиці та птахоферми), будівлі транспортних підприємств, виставково-розважальні комплекси та фізкультурно-оздоровчі об'єкти, торговельні комплекси, адміністративно-громадські будівлі, тощо.

Головним недоліком сталевих балок є їхня низька вогнестійкість. Висока теплопровідність сталі та відносно малі габарити перерізів сталевих балок є причиною їхнього швидкого нагрівання. Нагрівання сталевих балок до температури від 450 °C до 650 °C при діючих механічних навантаженнях є причиною нарощення пластичних деформацій, є для них руйнівними [1]. У більшості випадків такий стан спостерігається при тривалості 15-20 хв впливу стандартного температурного режиму пожежі, що, переважно, є недостатнім для відповідності сталевих балок вимогам щодо їхньої вогнестійкості. Для приведення у відповідність сталевих балок вимогам щодо їхньої вогнестійкості застосовують вогнезахисні системи.

Ефективними засобами для забезпечення відповідності сталевих балок вимогам щодо вогнестійкості є застосування вогнезахисних облицювань, у тому числі, гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Переваги їхнього використання зумовлене продуктивністю, монтажних операцій, порівняно невеликою вагою, невеликою вартістю і високими теплоізолювальними властивостями.

Для оцінювання вогнестійкості сталевих балок існує два основних підходи – експериментальний за методом вогневих випробувань та розрахунково-теоретичний. Вимоги щодо проведенні оцінювання вогнестійкості сталевих балок та вогнезахисної здатності пориттів експериментальними методами описані у стандарті [2]. Даний підхід є трудозатратним та вартісним. Альтернативою до використання експериментальних методів є застосування розрахункових методів. Настанови щодо здійснення розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахистом надаються у нормах [3].

З огляду на це, дослідження з питань вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням є актуальними.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідженням коефіцієнту теплопровідності різних вогнезахисних і будівельних матеріалів присвячено серію експериментальних і теоретичних робіт [4–16].

Робота [4] містить описання чотирьох варіантів оцінювання вогнезахисних властивостей облицювання сталевих балок. Там також описано різні варіанти застосування незахищених та захищених сталевих балок при залученні методу геометричного середнього аналітичного ранжування. У рамках цієї системи не розглянуто застосування гіпсокартонного облицювання в якості вогнезахисних засобів.

Робота [5] містить результати досліджень реальної поведінки сталевих балок при впливі пожежі. Проте дана робота не містить даних щодо поведінки сталевих балок із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням.

У роботі [6] наведено дані щодо випробування сталевих балок із спучувальними захисними покриттями. Досліди були виконані на обладнанні лабораторії Національної пожежної служби Італії. Проте у даних дослідженнях недостатньо приділено уваги випробуванням сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Робота [7] присвячено вивчення теплового впливу пожежі на експандований вермикуліт як модифікований наповнювач для збільшення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів. Проте у даній роботі недостатньо уваги приділено гіпсокартонним плитам як вогнезахисному засобу або елементу вогнезахисної системи сталевих балок.

Робота [8] містить систематизовані дані щодо проектування вогнезахисних сталевих балок за бразильською системою стандартів. Серед таких засобів пропонується використання облицювання гіпсокартонними плитами. Проте, у даній роботі не наведено вимог щодо конструктивних даних вогнезахисного облицювання такого типу.

У дослідженні [9] виконано порівняння результатів експериментальних досліджень та розрахункових даних щодо температури всередині вогнезахисних сталевих конструкцій в умовах пожежі за міжнародними рекомендаціями. Проте, дана робота містить обмежену кількість даних щодо верифікації наведених моделей.

Робота [10] присвячена комплексним хімічним дослідженням впливу хімічного складу в'язучих на поліпшення вогнезахисних властивостей вермикулітних та гіпсових плит. Проте, у даній роботі не приділено такий вплив на значення коефіцієнту теплопровідності і його зміну у залежності від температури нагрівання.

Результати досліджень, що наведені у роботі [11] описують вогнезахисні властивості полімерних покриттів сталевих балок. Випробування проводились при стандартному температурному режимі пожежі і на їхній основі було встановлено взаємозв'язок між їхніми конструктивними параметрами та межею вогнестійкості сталевих балок. Проте дані дослідження не містять даних щодо методик вивчення їхніх теплофізичних параметрів.

Робота [12] містить дані досліджень вогнезахисного покриття для сталевих балок на основі епоксидної смоли. Але наведені результати не порівнювалися з ефективністю інших вогнезахисних засобів, зокрема на основі гіпсокартонних плит.

Результати експериментальних, числових та теоретичних досліджень поведінки балок із вогнезахисним облицюванням описані у роботі [13]. Досліджено температурні показники нагрівання сталевих балок. В той же час питання вогнезахисту на основі гіпсокартонних плит таких балок не розглядалось.

У роботі [14] проаналізовано сучасні підходи до розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням. При цьому було запропоновано застосовувати удосконалений розрахунковий метод. Проте порівняльний аналіз його ефективності порівняно з іншими методами не виконувалося.

Результати, наведені у роботі [15], дозволяють прослідкувати залежність величини межі вогнестійкості сталевих балок від розкиду температури на їхній обігрівній поверхні. Робота [16] містить дані щодо впливу застосування різних температурних режимів пожежі відмінні від стандартного на вогнестійкість сталевих балок із вогнезахисним облицюванням. Проте залишились без уваги питання впливу таких режимів на сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Загалом можна зазначити, що дослідження, спрямовані на вивчення властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок як комплексу початкових даних для вирішення задачі розрахункового оцінювання їх вогнестійкості є актуальними.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження теплофізичних характеристик гіпсокартонного вогнезахисного облицювання фрагментів сталевих балок підданих вогневим випробуванням в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначити коефіцієнт теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання на основі температурних вимірювань, отриманих під час випробувань фрагментів сталевих балок із даним типом вогнезахисного облицювання.
- визначити температурну залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання для розрахунку температури у сталевих балок із даним типом вогнезахисту в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.
- визначити температурний режим нагрівання сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі із застосуванням отриманої залежності коефіцієнта теплопровідності даного облицювання.
- дослідити адекватність розрахункових показників температури для фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі на основі виявленої.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження було використано результати вогневих випробувань зразків, конструктивна схема яких представлена на рис. 1.

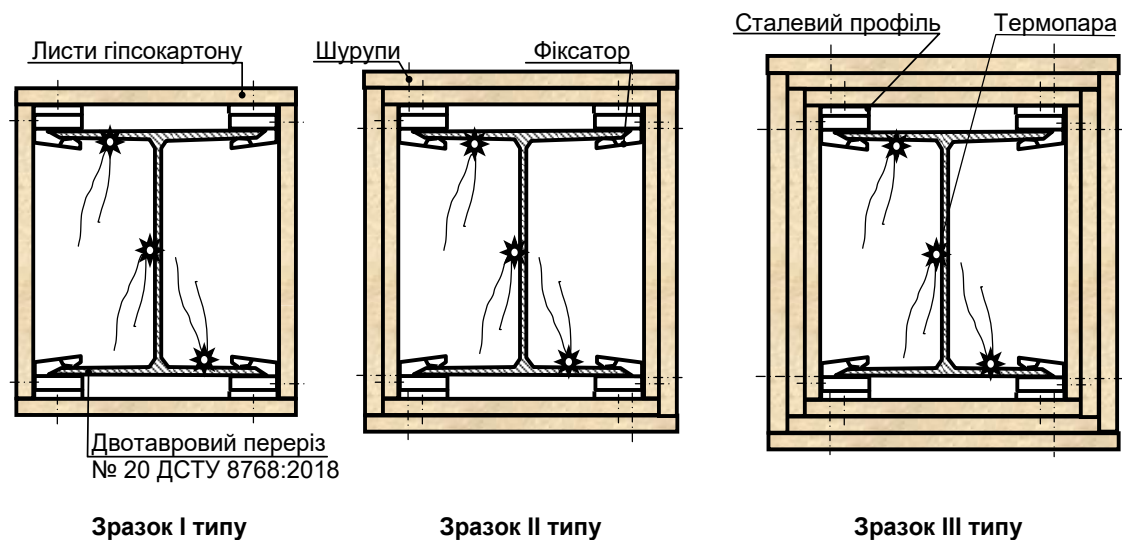


Рис. 1. Конструктивні схеми перерізів зразків для випробування

Для вивчення властивостей гіпсокартонних плит в умовах нагріву було передбачене вогнезахисне облицювання на основі листів з гіпсокартону вогнестійкого виробництва фірми «KNAUF (Україна)» розмірами 1200×2500 мм товщиною 12.5 мм, виготовлених за вимогами ТУУ Ст. 2.7 24577862.001 98.

Сталеві зразки із вогнезахисним облицюванням виготовлені у трьох модифікаціях: одно-, дво- та трьохшаровому виконанні. Для фіксації гіпсокартонного облицювання на

сталевому зразку були використані комплекти кріпильних деталей та сталевого профілю ПП 60/27 виробництва фірми «KNAUF (Україна)» табл. 1.

Таблиця 1

Параметри та товщини облицювання на зразках

Профіль зразка	Довжина зразка, l , м	Зведена товщина перерізу, δ , мм	Зведена товщина перерізу, δ_k , мм	Коефіцієнт перерізу A_{st}/V , м ⁻¹	Густина плит, кг/м ³	Товщина облицювання d , мм	Тип зразка
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	12,5	1
						25	2
						37,5	3

Для інтерпретації результатів вимірювань, отриманих під час вогневих фрагментів сталевих балок з вогнезахисним облицюванням відповідно до [2] застосовується рекурентна формула для визначення приращення коефіцієнту теплопровідності за встановлений проміжок часу, що має вигляд

$$\lambda_{p,t}(t) = \left[d_p \cdot \frac{V}{A} \cdot c_a \rho_a \cdot \left(1 + \frac{\phi}{3}\right) \cdot \frac{1}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] \cdot \left[\Delta \theta_{a,t} + (e^{10} - 1) \Delta \theta_t \right], \quad (1)$$

де $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{d_p A_p}{V}$, $\frac{A_p}{V}$ – коефіцієнт перерізу для сталеві балки, ізольованих

вогнезахисним матеріалом; c_a – питома теплоємність сталі, що залежить від температури; c_p – питома теплоємність матеріалу, що не залежить від температури; d_p – товщина вогнезахисного матеріалу; $\Delta t \leq 30$ – інтервал (проміжок) часу, для обчислення при значенні Δt більше 30 с, приймається значення рівне 30 с; $\Delta \theta_{a,t}$ – температура сталі в момент часу t ; $\theta_{g,t}$ – температура навколишнього газу в момент часу t ; $\Delta \theta_{g,t}$ – збільшення температури у приміщенні із пожежею за проміжок часу Δt ; λ_p – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи; ρ_a густина сталі; $\rho_p = 950$ кг/м³ – густина вогнезахисного матеріалу.

Для використання рівняння (1) використані температурні залежності теплофізичних характеристик сталі [2], які наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Теплофізичні характеристики конструкційної сталі

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

Згідно із рекомендаціями [2, 17] теплоємність вважається сталою і рівна $c_p = 1000$ Дж/(кг·°С).

На рис. 2. показані графіки залежності від часу величини середньої температури для кожного із зразків. Величина температури була усереднена за показниками трьох термопар, встановлених на сталевому зразку, як показано на рис. 1. На даних графіках також показані відхилення значень виміряної температури від значення математичного очікування.

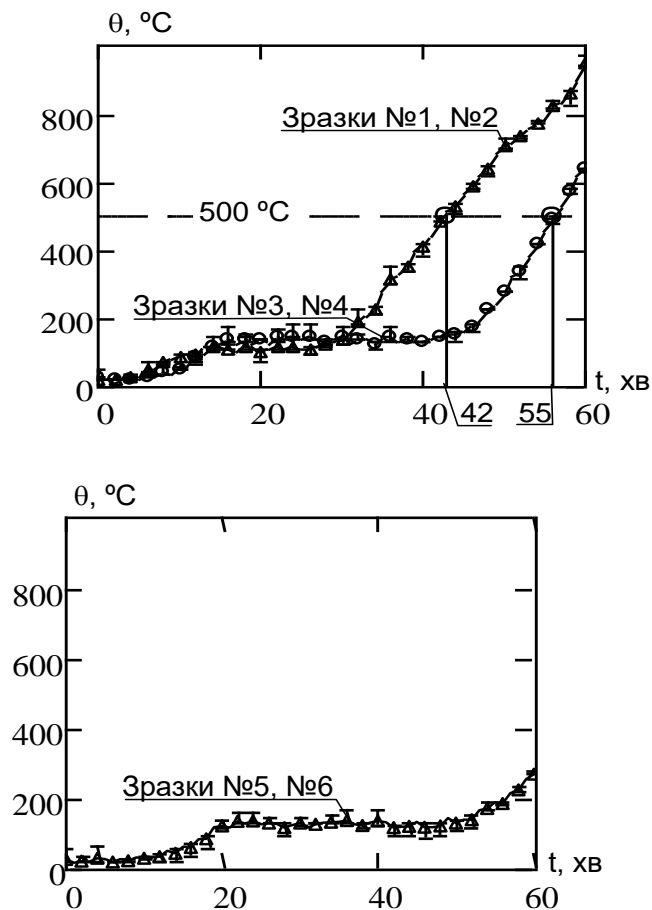


Рис. 2. Криві середньої температури для зразка одного типу усереднені за показниками з трьох термопар встановлених на поверхні сталевого осердя зразків у залежності від часу перербігу випробувань

Використовуючи дані, подані у табл. 1, та застосовуючи формулу (1), було виконано обчислення коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Одержані результати показані на рис. 3 у вигляді кривих залежностей коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання у залежності від часу випробування.

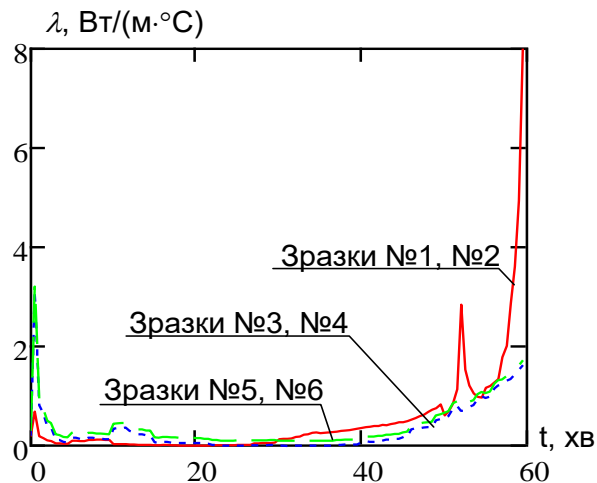


Рис. 3. Криві залежностей коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання зразків залежно від часу випробування

Криві, показані на рис. 3 мають характерні особливості, що можна прослідкувати на прикладі характеру зміни коефіцієнта теплопровідності при порівнянні товстого та тонкого шару облицювання. Існує помітна відмінність яка проявляється у появі максимуму графіку коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного облицювання малої товщини, і відсутності такого максимуму для зразків із товстішим шаром гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Поява такого максимуму пояснюється тим, що при малій товщині гіпсокартонного облицювання має місце вплив внутрішніх процесів у сталі, що має чіткий максимум теплоємності при досягнанні температур при яких спостерігається максимум у гіпсокартонному облицюванні.

При нагріванні всіх зразків із гіпсокартонним вогнезахисним облицювання залежність зміни коефіцієнта теплопровідності має подібний вигляд. Спільною особливістю є достатньо тривалий період збереження величини коефіцієнта теплопровідності на одному рівні. При досягненні більших температур з певного моменту коефіцієнт теплопровідності починає швидко зростати. Це може бути пояснено тим, що випаровується вільна волога у гіпсокартоні, а потім активізуються процеси деструкція гіпсу руйнування самого облицювання.

Також є помітною цікава особливість зміни коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання товщиною більше за 50 мм відповідних зразків фрагментів сталевих балок, що полягає у досягненні певного мінімуму на початкових стадіях з 30 хв. Вона може бути пояснена тим, що має місце більша кількість вологи, яка дислокується у каркасі гіпсового каменю у зразках, де гіпсокартонне вогнезахисне облицювання має більшу товщину. При нагріванні гіпсокартонного облицювання присутня волога починає випаровуватися і таким чином сповільнює процес нагріву і тим самим впливає на перебіг зміни коефіцієнта теплопровідності, як це можна побачити аналізуючи відповідні криві.

Враховуючи одержані результати, які були обчислені з використанням використаних розрахункових методик, було побудовано графік усередненої залежності величини коефіцієнта теплопровідності від температури. Отриманий графік показаний на рис. 4.

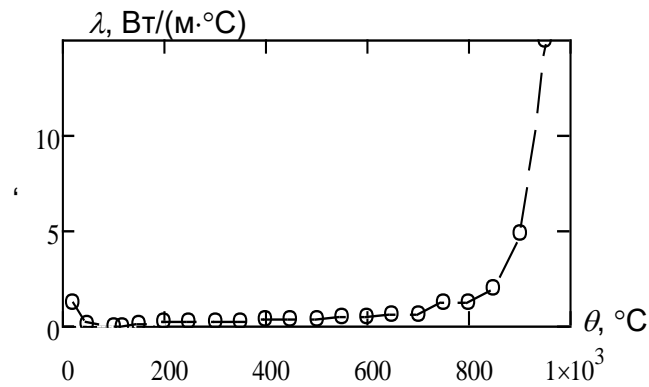


Рис. 4. Усереднена залежність величини коефіцієнта теплопровідності від табличних значень температури для зразків фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням

Для обчислень температури нагріву сталевих балок зручно застосовувати залежність коефіцієнта теплопровідності від температури у вигляді табличної форми, яка показана у табл. 3.

Таблиця 3

Таблична форма температурної залежності коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання

Коефіцієнт теплопровідності		Питома теплоємність	Густина, ρ , кг/м ³
θ , °C	$\lambda(\theta)$, Вт/(м·°C)	$c_p(\theta)$, Дж/(кг·°C)	
20	1.2	1000	950
50	0.094		
100	0.011		
150	0.023		
200	0.136		
250	0.2		
300	0.267		
350	0.266		
450	0.294		
500	0.341		
550	0.382		
600	0.418		
650	0.475		
700	0.553		
750	0.678		
800	0.611		
850	1.212		
900	1.201		
950	2.014		
1000	4.937		
1050	15		

Таким чином, була одержана залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання товщиною до 67.5 мм, що відповідає

попередньо встановленим даним питомої теплоємності та густини гіпсокартону (див. табл. 2)

Використовуючи дані щодо теплофізичних властивостей (див. табл. 3.8) гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, що було одержано розрахунковим шляхом, застосовуючи результати вогневих випробувань фрагментів сталевих балок було визначено температурні режими прогрівання випробуваних осердя випробовуваних. Для проведення обчислень температурних режимів нагріву зразків було застосовано рівняння

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t}. \quad (2)$$

Результати обчислень наведені у вигляді кривих температурних режимів нагріву сталевих осердя зарзків разом із кривим, що одержані експериментальним шляхом. Побудовані криві температурних режимів показані на рис. 5

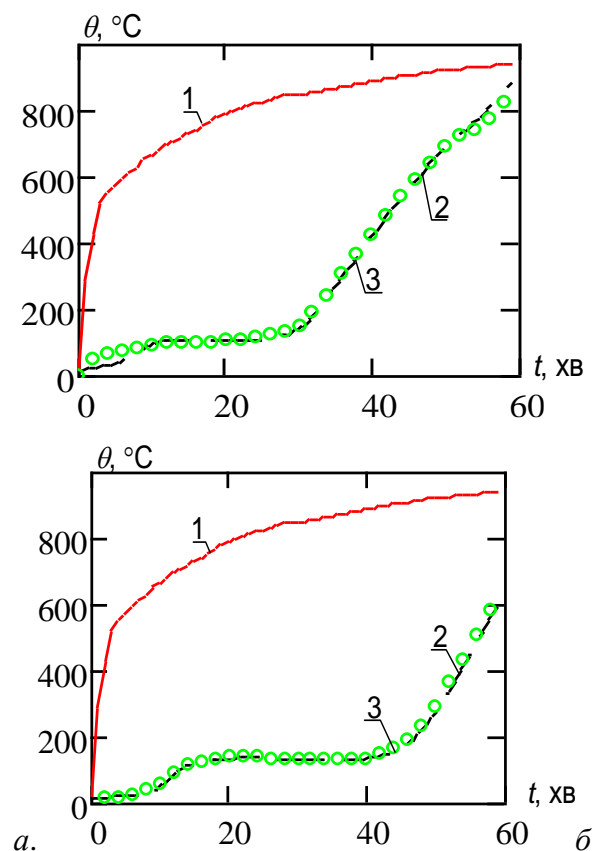


Рис. 5. Графіки температурних режимів нагріву сталевих осердя зразків балок №1, №2 (а) та зразків №3, №4 (б) з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням : 1 – стандартний температурний режим пожежі; 2 - експериментальні дані; 3 - розрахункові дані

Криві на рис. 5 вказують на невелику розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними, які одержані за узагальненою температурною залежністю коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою вивчення достовірності результатів обчислення температурних значень та критеріїв прийнятності результатів розрахунку параметрів теплового впливу пожежі на зразки фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням було визначено відповідні статистичні показники отриманих розрахункових даних. Обчислені показники середніх величин абсолютного відхилення, відносного відхилення, середньоквадратичного відхилення при порівняльному аналізі експериментальних і розрахункових даних для досліджуваних зразків зведені до табл. 4.

Таблиця 4

Абсолютні, відносні та середньоквадратичні при порівнянні розрахункових та експериментальних показників

№ зразка	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньоквадратичні відхилення, °С
1	40.796	12.89	18.27
2	37.673	12.682	9.655
3	30.345	9.082	6.09
4	39.271	14.505	17.24
5	15.07	4.247	3.915
6	25.302	8.3	9.619
Середні значення	31.41	10.284	10.798

Статистичні показники, показані у табл. 4 вказують на те, що похибка, отримана шляхом порівняльного аналізу розрахункових та експериментальних температурних даних у зразках фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням суттєвого впливу на точність розрахунків не має, оскільки середнє значення відносної похибки не перевищує 10.3 %, а значення середньоквадратичного відхилення є не вище 10.8 °С. Це дає змогу стверджувати, що за проведеним аналізом статистичних параметрів обчислених даних щодо температури одержана залежність коефіцієнта теплопровідності може бути застосована для розрахунків температури нагрівання сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Дані щодо розрахованих статистичних критеріїв для температурних показників відповідних випробуваних зразків подані у табл. 5.

Таблиця 5

Статистичні критерії щодо розрахованих температурних даних для випробуваних зразків сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням

№ зразка	Критерій Кохрена	Критерій Стьюдента	Критерій Фішера
1	0.411	0.703	0.904
2	0.396	0.641	0.907
3	0.624	0.659	0.986
4	0.578	0.68	0.927
5	0.85	0.876	0.959
6	0.684	0.823	0.931
7	0.549	0.656	0.886
8	0.584	0.72	0.928

Отримані дані у табл. 5 показують, що статистичні критерії, які характеризують розкид відхилень температур у досліджуваних зразках не перевищують табличних значень. Це значить, що одержана залежність коефіцієнта теплопровідності від температури може бути застосована як загальна для розрахунку температур нагрівання сталевих балок із гіпсокартонних вогнезахисним облицюванням.

6 ВИСНОВКИ

1. Одержана узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання від температури у табличній формі, яка може бути застосована для обчислення температури у сталевих балках із даним типом вогнезахисту у інтервалі значень його товщини до 67.5 мм при значенні питомої теплоємності 1000 Дж/(кг·°C) та густини 950 кг/м³.

2. Показано, що одержана залежність коефіцієнта теплопровідності від температури може бути застосована як загальна для розрахунку температурних показників при нагріванні у сталевих балок за стандартною температурною кривою із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, оскільки величина відносна похибка не перевищує 10.3 %, а величина середньоквадратичного відхилення не перевищує 10.8 °C.

3. Показано що статистичні критерії адекватності Кохрена, Стьюдента та Фішера, обчислених для результатів розрахунку температури у сталевих балках із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при порівняльному аналізі розрахункових та експериментальних даних мають значення не більше відповідно 0.7, 0.88 та 0.96 і не є більшими за табличні значення. Це означає, що результати обчислень при застосуванні отриманої залежності коефіцієнта теплопровідності від температури є адекватними.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автор не має відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Хоменко О. Г. Сталеві конструкції у будівництві. Глухів, 2018: Підручник – 347с.
2. ДСТУ EN 13381-8:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-8:2013, IDT).
3. EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
4. Akaa, O. U., Abu, A., Spearpoint, M., & Giovinazzi, S. (2016). A group-AHP decision analysis for the selection of applied fire protection to steel structures. *Fire Safety Journal*, 86, 95-105.
5. Wang, Y. C., & Kodur, V. K. R. (2000). Research toward use of unprotected steel structures. *Journal of structural engineering*, 126(12), 1442-1450.
6. Bilotta, A., de Silva, D., & Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*, 121, 410-422.
7. Xue, Y., Zhang, S., & Yang, W. (2015). Influence of expanded vermiculite on fire protection of intumescent fireproof coatings for steel structures. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(2), 357-364.
8. E Silva, V. P., & Fakury, R. H. (2002). Brazilian standards for steel structures fire design. *Fire Safety Journal*, 37(2), 217-227.
9. E. Silva, V. P. (2005). Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical

- process—a simple derivation. *Engineering Structures*, 27(14), 2036-2043.
10. Mohammadi, S., Shariatpanahi, H., & Taromi, F. A. (2015). Influence of hybrid functionalized graphite nanoplatelets-tripolyphosphate on improvement in fire protection of intumescent fire resistive coating for steel structures. *Polymer Degradation and Stability*, 120, 135-148.
 11. Watolla, M. B., Gluth, G., Sturm, P., Rickard, W. D. A., Krüger, S., & Schartel, B. (2017). Intumescent geopolymer-bound coatings for fire protection of steel.
 12. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2011). Effect of epoxy binder on fire protection and bonding strength of intumescent fire protective coatings for steel. In *Advanced Materials Research* (Vol. 168, pp. 1228-1232). Trans Tech Publications Ltd.
 13. Gardner, L. (2007). Stainless steel structures in fire. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 160(3), 129-138.
 14. Guoqiang, L. I. (2000). The development of fire-resistant design method for steel structures [J]. *Steel Construction*, 3.
 15. Nuianzin, O., Tyshchenko, O., Zhartovskiy, S., Zaika, P., & Peregin, A. (2019, December). The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 708, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.
 16. Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Hora, V., Shvydenko, A., & Samchenko, T. (2018). Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, (3 (10)), 21-27.
 17. EN 1991-1-2:2012: Eurocode 1. Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels.
 18. Франчук А.У. Таблиці теплотехнічних показників будівельних матеріалів, М.: НДІ будівельної фізики, 1969 - 142 с.

References

1. Khomenko, O. (2018) *Steel structures in construction*. Textbook – 347с.
2. DSTU EN 13381-8:2022 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 8: Applied reactive protection to steel members
3. EN 1993-1-2:2005 (2004) Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels.
4. Akaa, O. U., Abu, A., Spearpoint, M., & Giovinazzi, S. (2016). A group-AHP decision analysis for the selection of applied fire protection to steel structures. *Fire Safety Journal*, 86, 95-105.
5. Wang, Y. C., & Kodur, V. K. R. (2000). Research toward use of unprotected steel structures. *Journal of structural engineering*, 126(12), 1442-1450.
6. Bilotta, A., de Silva, D., & Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*, 121, 410-422.
7. Xue, Y., Zhang, S., & Yang, W. (2015). Influence of expanded vermiculite on fire protection of intumescent fireproof coatings for steel structures. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(2), 357-364.
8. e Silva, V. P., & Fakury, R. H. (2002). Brazilian standards for steel structures fire design. *Fire Safety Journal*, 37(2), 217-227.
9. e Silva, V. P. (2005). Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation. *Engineering Structures*, 27(14), 2036-2043.
10. Mohammadi, S., Shariatpanahi, H., & Taromi, F. A. (2015). Influence of hybrid functionalized graphite nanoplatelets-tripolyphosphate on improvement in fire protection of intumescent fire resistive coating for steel structures. *Polymer Degradation and Stability*, 120, 135-148.
11. Watolla, M. B., Gluth, G., Sturm, P., Rickard, W. D. A., Krüger, S., & Schartel, B. (2017). Intumescent geopolymer-bound coatings for fire protection of steel.
12. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2011). Effect of epoxy binder on fire protection and bonding strength of intumescent fire protective coatings for steel. In *Advanced Materials Research* (Vol. 168, pp. 1228-1232). Trans Tech Publications Ltd.
13. Gardner, L. (2007). Stainless steel structures in fire. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 160(3), 129-138.
14. Guoqiang, L. I. (2000). The development of fire-resistant design method for steel structures

- [J]. Steel Construction, 3.
15. Nuianzin, O., Tyshchenko, O., Zhartovskyi, S., Zaika, P., & Peregin, A. (2019, December). The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 708, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.
 16. Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Hora, V., Shvydenko, A., & Samchenko, T. (2018). Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, (3 (10)), 21-27.
 17. EN 1991-1-2:2002 (2002) Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels.
 18. Franchuk, A. (1969). Tables of thermal indicators of building materials, M. Research Institute of Building Physics, - 142 p.

Заїка Наталя Петрівна

Національний університет цивільного захисту України,
ад'юнкт,
вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18034
natali2194@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8757-5709

Для посилань:

Заїка Н. П. Дослідження теплових властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок в умовах пожежі. Механіка та математичні методи, 2025.Т. VII. № 1. с. 138–151

For references:

N. Zaika. (2025). Research on the thermal properties of gypsum plasterboard cladding of steel beams under fire conditions . Mechanics and mathematical methods. VII (1). 138–151.