

УДК 614.841.332

DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.6>

Андрій КОВАЛЬОВ¹, д-р техн. наук, с.н.с. (ORCID: 0000-0002-6525-7558)

Володимир ТРИГУБ¹, канд. техн. наук, доцент (ORCID: 0000-0002-5370-1340)

Дмитро ЖУРБИНСЬКИЙ¹, канд. техн. наук, доцент (ORCID: 0000-0002-7225-5606)

Ніна РАШКЕВИЧ¹, доктор філософії (ORCID: 0000-0001-5124-6068)

Сергій ЮРЧЕНКО², судовий експерт-вибухотехнік (ORCID: 0000-0002-2775-238X)

Денис КОЛОМІЄЦЬ¹ (ORCID: 0009-0001-8626-4861)

¹Національний університет цивільного захисту України

²Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ СТАЛІ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті проведено аналіз підходів до визначення критичної температури сталевих елементів і розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій відповідно до Єврокоду 3. В результаті аналізу встановлено, що в Україні проєктувальники робіт з вогнезахисту в якості основної критичної (проєктної) температури сталевих конструкцій з вогнезахисними покриттями й облицюваннями продовжують використовувати сталу температуру, що дорівнює 500 °C.

Проведено розрахунок критичної температури сталеві двотаврової балки №30 відповідно до сортаменту з відповідними номінальними розмірами та довідковими параметрами. У результаті розрахунків були отримані значення критичної температури для другорядної сталеві балки, що склало 868 °C.

Було здійснено підбір матеріалу та способу вогнезахисту для сталеві балки з метою підвищення її класу вогнестійкості до R 90 із застосуванням інтумесцентних вогнезахисних покриттів на водній основі (фарба з реактивною властивістю).

У відповідності до проведених вище розрахунків прийнято профільний коефіцієнт перерізу 213,3 м⁻¹ і критичну температуру сталеві балки 500 °C (перший варіант) та 868 °C (другий варіант).

Використовуючи табличні дані встановлено, що найближчим значенням профільного коефіцієнта перерізу є значення, що дорівнює 220 м⁻¹, а значенням критичної температури для другого варіанту – 750 °C. Таким чином, для заданих параметрів сталеві балки була підібрана мінімальна товщина вогнезахисного покриття, що досліджується, яка в першому варіанті склала 3,431 мм, а в другому – 1,601 мм.

Проведено розрахунок кількості вогнезахисної речовини на водній основі, що досліджується, необхідної для одержання захисного шару після обробки всіх конструкцій по контуру при різних значеннях критичної температури. Провели порівняння витрат вогнезахисної речовини при використанні різних значень критичної температури сталі.

Ключові слова: Єврокод, вогнестійкість, вогнезахист, критична температура, сталеві будівельні конструкції.

Постановка проблеми. З огляду на трансформації у глобальному безпековому середовищі, спричинені повномасштабною збройною агресією російської федерації проти України, яка з 2014 року зазнає систематичного руйнування об'єктів цивільної, соціальної інфраструктури та житлового фонду, перед державою постає масштабне завдання комплексного відновлення національного простору. Внаслідок вище викладеного та обстрілів, ракетних ударів, застосування безпілотних літальних апаратів, стрілецької зброї, а також потрапляння боєприпасів та їх уламків, значна кількість об'єктів критичної інфраструктури та житлового фонду зазнали серйозних пошкоджень або були повністю

зруйновані, а також залишилася велика кількість недобудов, які були зведені в межах каркасу будівлі та законсервовані. Особливо це стосується каркасних будівель громадського призначення, в якості каркасу яких використовуються сталеві конструкції.

В умовах повоєнної відбудови об'єктів критичної інфраструктури та інших об'єктів після поновлення будівництва таких об'єктів та розробки нових проєктів на будівництво виникатимуть питання, пов'язані з розташуванням в просторі таких недобудов протипожежних відсіків, які не були закладені в попередніх проєктах. Відповідно виникне і на даний час вже виникає потреба у підвищенні меж вогнестійкості будівельних конструкцій до нормованих значень, а також захисту наявних конструкцій від впливу вогню. Проблема забезпечення необхідних меж вогнестійкості розглянутих будівельних конструкцій є вельми актуальною.

Оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів сталевих несучих будівельних конструкцій полягає в отриманні залежності мінімальної товщини вогнезахисного покриття від приведеної товщини металу (коефіцієнту перерізу) і нормованого значення межі вогнестійкості для заданої критичної температури сталі. Значення критичної температури визначається проєктною документацією залежно від марки сталі та проєктних навантажень на сталеву конструкцію.

Імплементация в Україні стандартів [1 – 2], які гармонізовані з Європейськими стандартами групи А (Єврокодами), дозволяє застосовувати диференційний підхід до визначення критичної температури сталевих елементів і розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій відповідно до Єврокоду 3. Однак, в Україні проєктувальники робіт з вогнезахисту в якості основної критичної (проєктної) температури сталевих конструкцій з вогнезахисними покриттями й облицюваннями згідно [3] продовжують використовувати сталу температуру, що дорівнює 500 °С. Це приводить до збільшення товщини вогнезахисного покриття (відповідно до збільшення затрат на вогнезахист) або навіть до неможливості використання певних вогнезахисних матеріалів, що також призводить до збільшення витрат замовника на вогнезахист. Тому питання обґрунтування критичної температури сталі для проєктування вогнезахисних сталевих конструкцій, а особливо в умовах впливу температурних режимів, відмінних від стандартних, є актуальною науково-технічною задачею. Розв'язання цієї задачі сприятиме підвищенню рівня протипожежного захисту будівельних об'єктів та створить умови для правильного оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій при різних умовах роботи та різних впливах. А це, своєю чергою, позитивним чином вплине на основні показники пожежної статистики.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Проблематика оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій на основі обґрунтування критичної температури сталі є предметом активних досліджень багатьох провідних науковців як в Україні, так і за її межами. У [4] наведено результати експериментальних випробувань сталевих пластин різних геометричних параметрів із вогнезахисним покриттям на водній основі, спрямованих на дослідження теплофізичних властивостей покриття та встановлення залежності між температурним приростом та товщиною захисного покриття за умов дії стандартного температурного режиму та режиму пожежі, яка повільно розвивається. При цьому, граничним станом з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності обрано досягнення критичної температури сталі 500 °С з не обігрівної поверхні пластини. В [5] досліджено поведінку сталевих порожнистих колон при підвищених температурах. В результаті розроблено скінченно-елементні моделі для комп'ютерного моделювання поведінки таких колон за підвищених температур при застосуванні проєктної температури сталі 500 °С. Проте не враховано як впливає заданий рівень навантаження на колону і як дані моделі можливо застосовувати для сталевих конструкцій із вогнезахистом.

У [6] проведено дослідження реактивних вогнезахисних покриттів із оцінюванням їх експлуатаційних характеристик за умов чотирьох різних температурних сценаріїв пожежі – стандартного, вуглеводневого, а також двох експериментально сформованих температурних кривих зі зниженою інтенсивністю теплового впливу. Водночас питання розрахункового

визначення вогнестійкості сталевих конструкцій із застосуванням вогнезахисних покриттів з урахуванням науково обґрунтованих значень критичної температури сталі, відмінних від умовної температури 500 °С, залишилися недостатньо висвітленими.

В роботах [7–9] авторами розглядалися питання щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою різних вогнезахисних покриттів та умов впливу. Проте, нерозкритими залишилися питання щодо обґрунтування критичної температури сталі для проектування вогнезахисних сталевих конструкцій. Це факт потребує подальших досліджень, виходячи з того, що компоненти математичної моделі повинні відображати основні фізичні процеси, що безпосередньо впливають на точність оцінювання вогнестійкості конструкції, зокрема необхідну просторовість розподілу температури, напруги та неоднорідність будівельної конструкції за структурою та фізичними властивостями її окремих елементів. При цьому, критерієм достовірності результатів розрахунку повинна бути їх відповідність результатам випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість, яка в свою чергу, залежить від повноти врахування фізичних процесів у розроблених чи обраних фізичних та математичних моделях, точності задавання коефіцієнтів, що входять до математичної моделі та точності інтегрування системи рівнянь математичної моделі.

Постановка задачі та її розв’язання. Метою даної роботи було обґрунтування необхідності розрахунку вогнестійкості (визначення критичної температури сталевих елементів) сталевих конструкцій відповідно до Єврокоду 3 з обґрунтованою критичною температурою сталі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розрахувати критичну температуру сталі згідно Єврокоду 3 та провести розрахунок товщини вогнезахисного покриття для підвищення меж вогнестійкості сталевих конструкцій;
- виконати порівняння витрат вогнезахисного покриття.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. У разі пожежі повинен бути забезпечений достатній запас несучої здатності сталевих конструкцій протягом необхідного періоду часу.

Оцінювання несучої здатності конструкції в контексті протипожежного захисту повинно здійснюватися з урахуванням регламентованих моделей теплового та механічного впливу, відповідних конкретних розрахункових сценаріїв пожежі, а також з використанням температурно-залежних характеристик матеріалів конструкції.

У випадках, коли потрібно забезпечити механічну міцність в умовах пожежі, сталеві конструкції повинні бути запроектовані та змонтовані таким чином, щоб вони могли виконувати свою несучу функцію протягом всього часу дії пожежі.

Розрахункова оцінка вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій об’єкта має проводитися у чіткій послідовності, відповідно до положень [1], а також з урахуванням норм [2], етапи якої наведено нижче:

1. Ідентифікація конструктивних елементів (визначення типу сталевих елементів, встановлення геометричних розмірів, умов обпирання).
2. Визначення пожежної навантаги та вибір температурного режиму пожежі в залежності від типу будівлі та функціонального призначення. За потреби – врахування впливу систем автоматичного пожежогасіння (сповільнення росту температури).
3. Теплотехнічний розрахунок (термоаналіз), що включає в себе визначення підвищення температури у сталевому профілі в залежності від тривалості пожежі з урахуванням теплового потоку (конвекція, випромінювання, теплопровідність), властивостей вогнезахисного покриття (при наявності), геометрію профілю та площі теплообміну.
4. Визначення зниження міцності та жорсткості сталі: межі текучості, модуля пружності, межі міцності в залежності від температури [1], побудова залежності механічних властивостей від температури.
5. Аналіз напружено-деформованого стану конструкції при знижених характеристиках

сталі з урахуванням додаткових впливів температурних деформацій, нерівномірного прогріву (асиметричне навантаження), пожежної навантаги та впливу інших навантажень.

6. Визначення межі вогнестійкості (R), тобто моменту, коли конструкція втрачає несучу здатність та порівняння з нормованою вогнестійкістю (наприклад, R 30, R 60, R 90).

Якість вогнезахисної обробки сталевих конструкцій визначається двома ключовими факторами: обґрунтованістю технічних рішень, закладених в проектну документацію на виконання вогнезахисних робіт, а також коректністю вибору типу вогнезахисного матеріалу. Вибір способів та засобів вогнезахисту здійснюється на етапі розробки проекту виконання робіт для конкретного будівельного об'єкту, з урахуванням сукупності нормативних та технічних вимог:

– визначеного класу вогнестійкості конструкцій, який встановлюється відповідно до нормативного ступеня вогнестійкості будівлі та регламентує мінімально допустимий час збереження несучої здатності елемента в умовах пожежі;

– розрахункових коефіцієнтів перерізу конструкції для профільних або коробчастих елементів, які визначають інтенсивність теплового впливу на одиницю об'єму сталі та безпосередньо впливають на ефективність вогнезахисного покриття;

– значень критичної температури сталевих конструкцій, обумовлені характером навантаження та допустимим рівнем втрати міцності, що застосовуються як граничний критерій при розрахунку часу втрати несучої здатності конструктивного елемента.

В якості прикладу проведемо розрахунок нормальної балочної клітки, каркас якої являє собою сталеву конструкцію, в якій колони та головні балки прийняті зі зварних профілів, другорядні балки – з прокатних двотаврів.

Розрахунок для прикладу проведемо для другорядної балки, проліт якої складає 4,5 м, ширина, за якою збирається навантаження на балку – 1,5 м. Відповідно до сортаменту згідно з [5] приймаємо двотавр №30.

Конструкція виконана зі сталі марки С235, постійне навантаження складає $G_k=2\text{кН/м}^2$, змінне навантаження $Q_k=0,5\text{кН/м}^2$. Умови обігріву з трьох сторін. Закріплення шарнірне з двох боків.

Відповідно з [10] приймаємо номінальні розміри та довідкові параметри двотавру, що представлені у табл.1.

Таблиця 1 – Геометричні розміри сталевих балок, що досліджуються

Двотавр	h, мм	b, мм	s, мм	t, мм	R, мм	Площа поперечного перерізу A, мм ²	Маса l м, кг	Радіус інерції i, см	W _{el,x} , см ³	W _{pl,x} , см ³
30	300	135	6,5	10,2	12	46,5	36,5	12,3	472	516

При проектуванні конструктивних елементів без урахування геотехнічних впливів, частинні коефіцієнти надійності для першої групи граничних станів приймаються згідно з національним додатком. Частинний коефіцієнт надійності для постійних дій дорівнює $\gamma_G=1,35$, а частинний коефіцієнт надійності для перемінних дій $\gamma_Q=1,5$, $\xi=0,85$, $\psi_{0,1}=0,7$.

При визначенні розрахункового сполучення навантажень обираємо менш сприятливий варіант [1 – 2]:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} =$$

$$= 1,35 \cdot 2 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 3,225 \text{ кН/м}^2.$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 2 + 1,5 \cdot 0,5 = 3,045 \text{ кН/м}^2. \quad (1)$$

Використовуючи формулу (1), визначили розрахункове сполучення навантажень:
 $3,225 \text{ кН/м}^2 > 3,045 \text{ кН/м}^2$.

Розрахункове навантаження на погонний метр сталеві балки з урахуванням кроку між балками 1,5 м та ваги самої балки становить:

$$F_d = 3,225 \cdot 1,5 + \frac{36,5 \cdot 0,98}{100} = 5,2 \text{ кН/м}. \quad (2)$$

Максимальний згинальний момент в балці при рівномірно розподіленому навантаженні:

$$M_{Ed} = \frac{F_d \cdot L^2}{8} = \frac{5,2 \cdot 4,5^2}{8} = 13,2 \text{ кНм}. \quad (3)$$

Понижуючий коефіцієнт η_{fi} , враховуючи, що $\psi_{2,1}=0,6$ та $\psi_{0,1}=0,7$ визначався за формулою (4):

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}}{1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1}} = \frac{2 + 0,6 \cdot 0,5}{1,35 \cdot 2 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,5} = 0,71$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}}{1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,1}} = \frac{2 + 0,6 \cdot 0,5}{1,15 \cdot 2 + 1,5 \cdot 0,5} = 0,76 \quad (4)$$

Використовуючи формулу (4), було знайдено η_{fi} для $\psi_{2,1}=0,6$ та $\psi_{0,1}=0,7$.
 Приймаємо найменше значення $\eta_{fi}=0,71$.
 Розрахункове навантаження в умовах пожежі:

$$M_{fi,d,t} = M_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot M_d = 0,71 \cdot 13,2 = 9,4 \text{ кНм}. \quad (5)$$

Перевірка Класу поперечного перерізу балки:

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \left[\frac{235}{f_y} \right]^{0,5} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85. \quad (6)$$

Для полиці:

$$c = \frac{b-s-2 \cdot R}{2} = \frac{135-6,5-2 \cdot 12}{2} = 52,25 \text{ мм}. \quad (7)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{52,25}{10,2} = 5,12. \quad (8)$$

Граничне співвідношення ширини полиці до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{t} \leq 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 0,85 = 7,65. \quad (9)$$

Перевіряємо умову: $5,12 < 7,65$

Таким чином, полиця поперечного перерізу балки відноситься до 1-го Класу.

Для стінки:

$$c = h - 2 \cdot t - 2 \cdot R = 300 - 2 \cdot 10,2 - 2 \cdot 12 = 255,6 \text{ мм.} \quad (10)$$

$$\frac{c}{s} = \frac{255,6}{6,5} = 39,3. \quad (11)$$

Граничне співвідношення висоти стінки до товщини для 1-го Класу поперечних перерізів дорівнює:

$$\frac{c}{s} \leq 72 \cdot \varepsilon = 72 \cdot 0,85 = 61,2. \quad (12)$$

Перевіряємо умову: $39,3 < 61,2$

Отже, стінка при чистому згині відноситься до 1-го Класу.

Таким чином, при впливі підвищеної температури переріз балки відноситься до 1-го Класу.

Несуча здатність конструкції за міцністю при нормальній температурі:

$$M_{Rd} = \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{516 \cdot 235}{1} \cdot 10^{-3} = 121,26 \text{ кНм.} \quad (13)$$

Ступень використання μ_0 :

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{9,4}{121,26} = 0,077. \quad (14)$$

Критична температура $\Theta_{a,cr}$:

$$\Theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482. \quad (15)$$

Отже, критична температура другорядної сталеві балки склала $\Theta_{a,cr}=868^\circ\text{C}$.

Розрахунок вогнезахисту для другорядної сталеві балки з метою підвищення класу вогнестійкості до R 90 складається з розрахунку коефіцієнту перерізу A_m/V :

$$A_m/V = \frac{b+2 \cdot (b-s)+4 \cdot t+2 \cdot (h-2 \cdot t)}{A}. \quad (16)$$

Згідно (16) було проведено розрахунок коефіцієнту перерізу A_m/V , що склав $213,3 \text{ м}^{-1}$.

Виходячи з проведених вище розрахунків було здійснено підбір матеріалу та способу вогнезахисту для сталеві балки з метою підвищення класу вогнестійкості до R 90. Для цього застосовувалися інтумесцентні вогнезахисні покриття, і для прикладу була підібрана одна з вогнезахисних речовин на водній основі (фарба з реактивною властивістю), і були проведені випробування відповідно до [11].

У відповідності до проведених вище розрахунків прийнято профільний коефіцієнт перерізу $A_m/V=213,3 \text{ м}^{-1}$ і критичну температуру сталеві балки згідно [3] $\Theta_{a,cr}=500^\circ\text{C}$ (перший варіант) та згідно [1] $\Theta_{a,cr}=868^\circ\text{C}$ (другий варіант).

Із таблиці сертифікату відповідності на обраний вогнезахисний засіб можна побачити, що найближчим значенням профільного коефіцієнта перерізу є $A_m/V=220 \text{ м}^{-1}$ (оскільки обране значення коефіцієнта перерізу сталеві конструкції повинно бути не менше розрахункового), а значенням критичної температури для другого варіанту $\Theta_{a,cr}=750^\circ\text{C}$ (оскільки обране значення критичної температури сталі повинно бути не більше розрахункового).

Таким чином, для заданих параметрів сталеві балки мінімальна товщина вогнезахисного покриття, що досліджується, в першому варіанті складає $d_p=3,431 \text{ мм}$, а в другому $d_p=1,601 \text{ мм}$.

Розрахунок кількості вогнезахисної речовини на водній основі, що досліджується,

необхідної для одержання захисного шару товщиною d_p визначали за формулою:

$$m = 2.05 \cdot S_0 \cdot d_p \cdot (1 + A_1 + A_2), \quad (17)$$

де 2,05 (кг/м²) – витрата вогнезахисної речовини при товщині сухого шару покриття 1 мм; S_0 – площа поверхні, що обробляється, м²; d_p – товщина вогнезахисного покриття, мм; A_1 – коефіцієнт врахування технологічних втрат вогнезахисної речовини залежно від конфігурації об'єкту вогнезахисту ($A_1=0,09$); A_2 – коефіцієнт врахування технологічних втрат вогнезахисної речовини залежно від методу нанесення (для механізованого способу нанесення $A_2=0,012$, для ручного нанесення $A_2=0,009$).

В даному прикладі маємо 32 другорядні сталеві балки довжиною $L=4,5$ м та площею обробки всіх конструкцій по контуру $S_0=162,288$ м². Обробку проводили механізованим способом. Таким чином в першому варіанті кількість вогнезахисної речовини згідно (17) складе 1258 кг, а в другому варіанті – 587 кг.

Таким чином, економія складає 671 кг (зменшення витрат на 53%).

Висновки.

1. За результатами виконаних досліджень встановлено, що розраховані критичні температури сталевих конструкцій, за винятком конструкцій з 4 класом поперечного перерізу, перевищують значення загальноприйнятої критичної температури (500 °С). Проведено розрахунки критичної температури сталі згідно Єврокоду 3, в результаті якого встановлено, що за контрольний термін часу випробування (90 хв) в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі для сталеві двотаврової балки з значенням профільного коефіцієнта перерізу 220 м⁻¹ при її обігріві з трьох сторін, якщо застосовувати в якості критичної температури 500 °С, товщина реактивного вогнезахисного покриття повинна дорівнювати 3,431 мм. Якщо при тих самих умовах застосовувати в якості критичної температури 750 °С (визначено при розрахунках), то товщина вогнезахисного покриття повинна дорівнювати 1,601 мм.

2. Застосування розрахункових значень критичної температури під час проєктування вогнезахисної обробки сталевих конструкцій дає змогу оптимізувати витрати вогнезахисного матеріалу, а отже – і зменшити загальні витрати, пов'язані з виконанням відповідних робіт. У цьому контексті визначення критичної температури сталі є ключовим етапом проєктування вогнезахисту, що безпосередньо впливає на ефективність забезпечення пожежної безпеки будівель і споруд, в частині забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3: Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 98 с.
2. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проєктування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
3. ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT). [Чинний від 2024-03-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. 65 с.
4. De Silva, D., Bilotta, A., Nigro, E. Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 205. P. 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223>.
5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.
6. 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102951>.

7. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flameretardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
8. 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. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.008>.
9. Both, I., Wald, F., & Zaharia, R. (2016). Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(2), 275–284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
10. ДСТУ 8768:2018. Двотаври сталеві гарячекатані. Сортамент. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 9 с.
11. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p.

REFERENCES

1. DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Yevrokod 3: Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist (EN 1993-1-2:2005, IDT). [Chynnyi vid 2013-07-01]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2012. 98 p.
2. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist. [Chynnyi vid 2017-06-01]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2016. 111 p.
3. DSTU EN 1363-1:2023 Vyprobuvannia na vohnestiikist. Chastyna 1. Zahalni vymohy (EN 1363-1:2020, IDT). [Chynnyi vid 2024-03-01]. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2024. 65 p.
4. De Silva, D., Bilotta, A., Nigro, E. Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 205. P. 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223>.
5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.
6. 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102951>.
7. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flameretardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
8. 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. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.008>.
9. Both, I., Wald, F., & Zaharia, R. (2016). Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(2), 275–284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
10. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p.

Andrii KOVALOV¹, Doctor of Technical Sciences
Volodymyr TRYHUB¹, PhD in technical sciences, docent
Dmytro ZHURBINSKY¹, PhD in technical sciences, docent
Nina RASHKEVICH¹, PhD
Serhii YURCHENKO², Court explosive technician expert
Denys KOLOMIETS¹

¹National University of Civil Protection of Ukraine

²Cherkasy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs in Ukraine

USTIFICATION OF CRITICAL TEMPERATURE OF STEEL FOR DESIGN OF FIRE-RESISTANT STEEL STRUCTURES

The article analyzes approaches to determining the critical temperature of steel elements and calculating the fire resistance of steel structures in accordance with Eurocode 3. The analysis found that in Ukraine, fire protection designers continue to use a constant temperature of 500 °C as the main critical (design) temperature of steel structures with fire-retardant coatings and cladding.

The critical temperature of the steel I-beam No. 30 was calculated according to the assortment with the corresponding nominal sizes and reference parameters. As a result of the calculations, the critical temperature value for the secondary steel beam was obtained, which was 868 °C.

The material and method of fire protection for a steel beam were selected in order to increase its fire resistance class to R 90 using water-based intumescent fire-retardant coatings (paint with reactive properties).

In accordance with the calculations above, the profile section coefficient of 213.3 m⁻¹ and the critical temperature of the steel beam of 500 °C (first option) and 868 °C (second option) were adopted.

Using tabular data, it was established that the closest value of the profile cross-section coefficient is a value equal to 220 m⁻¹, and the critical temperature value for the second option is 750 °C. Thus, for the given parameters of the steel beam, the minimum thickness of the fire-retardant coating under study was selected, which in the first option was 3.431 mm, and in the second - 1.601 mm.

The amount of water-based fire retardant under study, required to obtain a protective layer after processing all structures along the contour at different critical temperature values, was calculated. The consumption of fire retardant was compared when using different critical temperature values of steel.

Key words: Euro code, fire resistance, fire protection, critical temperature, steel building structures.