

УДК 614.841.415

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.-96-103>

*Олександр Нуянзін, канд. техн. наук, доцент (ORCID: 0000-0003-2527-6073),  
Віктор Гвоздь, канд. техн. наук, професор (ORCID: 0000-0003-0818-7810),  
Сергій Поздєєв, д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0002-9085-0513),  
Ольга Некора, канд. техн. наук, с. н. с. (ORCID: 0000-0002-5202-3285),  
Олена Борсук, канд. техн. наук (ORCID: 0000-0001-5759-4506),  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЧАСУ ВІДШАРУВАННЯ ВОГНЕЗАХИСНОГО МІНЕРАЛОВАТНОГО ОБЛИЦЮВАННЯ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ ВІД КОЕФІЦІЄНТУ ПЕРЕРІЗУ ТА КОЕФІЦІЄНТУ НАВАНТАЖЕННЯ

У даній статті продовжено роботу щодо дослідження прогрівання сталеві балки та часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки. Вивчено залежність часу відшарування від коефіцієнту перерізу балки та коефіцієнту навантаження.

Серед великого розмаїття вогнезахисних систем для сталевих балок останнім часом великого поширення зазнали системи на основі мінераловатного облицювання. Їхньою особливістю є використання високоміцних клейових з'єднань, стійких до температурного впливу. Але, при цьому, невелика міцність мінераловатних панелей створює велику ймовірність відшарування мінераловатного облицювання по її шарах і в наслідок чого, може призвести до втрати вогнезахисної здатності протягом часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, що встановлюється відповідним класом вогнестійкості. Тож установа відповідність тому чи іншому класу вогнестійкості має бути піддана корекції з огляду на таку обставину.

Для обчислення коефіцієнтів регресійної моделі було відтворено 8 чисельних експериментальних ситуацій. Результати чисельних експериментів для реалізації розрахунків повинні бути отримані за ортогональним планом.

Для вивчення впливу найбільш значущих конструктивних параметрів сталевих балок на час відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання були побудовані взаємні залежності конструктивних параметрів за умови трьох можливих величин товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання: 25 мм, 50 мм та 75 мм, що кратні половині товщини мінераловатної плити.

Встановлені закономірності і побудована математична модель зміни часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання в залежності від їх коефіцієнту перерізу  $A/V_m$ , товщини мінераловатного облицювання  $d$  та рівня навантаження  $\mu$ ; побудовані номограми для визначення часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок у залежності від їх коефіцієнту перерізу та рівня навантаження при трьох величинах товщини мінераловатного вогнезахисного облицювання.

**Ключові слова:** облицювання із мінеральної вати, вогнестійкість, вогнезахисна здатність, сталеві балки, цілісності вогнезахисного покриття.

**Постановка проблеми.** Аналіз даних статистики пожеж за останні 5 років вказує на збільшення їх кількості, зокрема у будівлях із сталевими каркасами їх кількість складає одну третину від загальної кількості. Більш як половина елементів сталевих каркасів будівель даного типу потребує улаштування вогнезахисних систем.

Із великого різновиду вогнезахисних систем для сталевих балок останнім часом значного поширення зазнали системи на основі мінераловатного облицювання. Їхньою особливістю є використання високоміцних клейових з'єднань, стійких до температурного

впливу. Однак, невелика міцність мінераловатних панелей створює можливість ймовірного відшарування мінераловатного облицювання по її шарах, що призводить до втрати вогнезахисної здатності протягом часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, що встановлюється відповідним класом вогнестійкості. Тож установлена відповідність тому чи іншому класу вогнестійкості має бути піддана корекції з огляду на таку обставину.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Аналіз наукових робіт, виконаних у галузі вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисними системами показав, що методи оцінки вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням з огляду на можливість відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання не були досліджені. Це є стримуючою обставиною для застосування сталевих балок із мінераловатним вогнезахистом або є причиною помилок при проектуванні вогнестійких сталевих конструкцій будівель та споруд з точки зору їхньої пожежної безпеки.

У попередній роботі [1] при вирішенні основних завдань було визначено температурний режим прогрівання сталеві балки, при якому був врахований факт втрати цілісності вогнезахисного покриття внаслідок теплового впливу пожежі. За отриманим температурним режимом прогрівання значення межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття має залежність від напружено-деформованих станів у сталевій балці.

Роботи [1-3] дають чітку відповідь на питання чому сталеві будівельні конструкції потребують вогнезахисту. Тому дослідження їхнього прогрівання з вогнезахисним мінераловатним покриттям облицюванням сприятиме розвитку даного напрямку. У попередній роботі [4] були розглянуті процеси втрати цілісності вогнезахисного облицювання із мінеральної вати сталеві двотаврої балки та досліджено умови, за яких вогнезахисне облицювання втрачає свою цілісність та вогнезахисну здатність.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.** Проаналізовані нормативні документи [5-7], результати отримані в роботі [1], а також роботи дослідників [2-4] вказали на доцільність дослідження залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки від коефіцієнту перерізу та коефіцієнту навантаження. Отже, встановлено доцільність дослідити температурний режим прогрівання сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття з мінераловатного облицювання з визначення показників та побудови номограм для визначення часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок при відомих параметрах.

**Постановка мети.** Метою даної роботи є встановлення закономірності і побудова математичної моделі змін часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання в залежності від їх коефіцієнту перерізу, товщини мінераловатного облицювання та рівня навантаження. Побудувати на їх основі номограми для визначення часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок у залежності від їх коефіцієнту перерізу та рівня навантаження при трьох величинах товщини мінераловатного вогнезахисного облицювання.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.** Необхідно запропонувати метод проектування сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, що беруть до уваги можливість втрати його цілісності та вогнезахисної здатності внаслідок теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, потрібно розробити систему поправочних коефіцієнтів, що знижують значення межі вогнестійкості внаслідок раптового руйнування вогнезахисної системи. Для досягнення поставленого завдання доцільно використати регресійну модель, що побудована на основі повного факторного експерименту.

Для побудови регресійної залежності запропоновано план чисельного експерименту зі значущими й незалежними параметрами, що мають найбільший вплив у разі настання відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання. З огляду на виконані дослідження, результати яких подані в [1, 4], такими незалежними факторами є коефіцієнт

перерізу сталеві балки з мінераловатним вогнезахистом  $A/V_m$ , товщина шару вогнезахисного мінераловатного облицювання  $d$  та коефіцієнт навантаження  $\mu$ . У таблиці 1 подано границі інтервалів описаних факторів для здійснення чисельного повного факторного експерименту.

Таблиця 1 – Діапазони варіювання факторів у чисельному повному факторному експерименті

Коефіцієнт перерізу балки, $A/V_m, \text{ м}^{-1}$			Товщина шару вогнезахисного облицювання, мм			Коефіцієнт навантаження		
Найменше значення, $A/V_{m-1}$	Середнє значення, $A/V_{m0}$	Найбільше значення, $A/V_{m1}$	Найменше значення, $d_{-1}$	Середнє значення, $d_0$	Найбільше значення, $d_1$	Найменше значення, $\mu_{-1}$	Середнє значення, $\mu_0$	Найбільше значення, $\mu_1$
56	206	356	25	50	75	0,1	0,5	0,8

На рис. 1 наведені графіки зміни максимального прогину балки та швидкості нарощування максимального прогину у залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі [1].

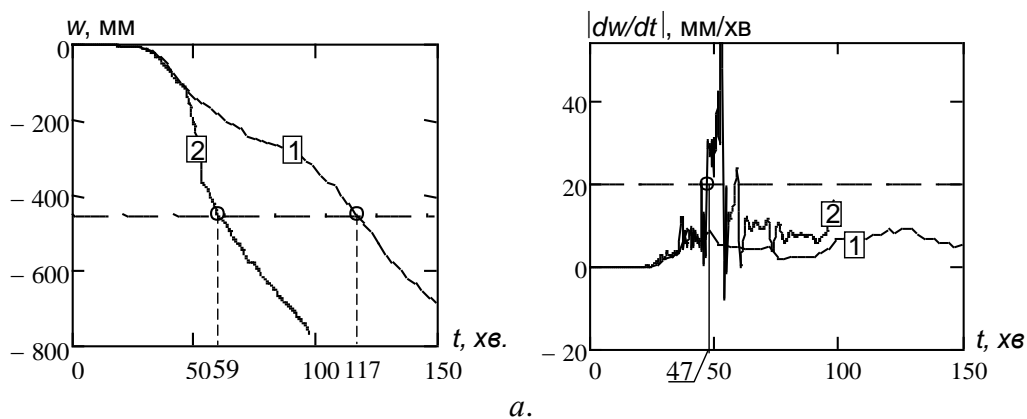


Рисунок 1 – Графіки зміни максимального прогину балки (а) та швидкості нарощування максимального прогину (б) у залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – для балки із мінераловатним вогнезахистом, що не втрачає свою цілісність; 2 для балки із мінераловатним вогнезахистом, що втрачає свою цілісність і вогнезахисну здатність

Аналіз графіків на рис. 1 засвідчив, що залежність межі вогнестійкості й часу настання відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання від найбільш значущих конструктивних параметрів сталеві балки наближена до лінійних. Це слугує основою гіпотези про те, що регресійна залежність межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності для сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням також може бути прийнята лінійною. Найбільш значущі конструктивні параметри сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням, визначені для побудови регресійної моделі, є незалежними за фізичною природою.

З огляду на висловлені припущення, регресійна модель, що виявляє залежність межі вогнестійкості сталеві балки з мінераловатним вогнезахисним облицюванням за граничним

станом втрати несучої здатності від визначених конструктивних параметрів, має такий вигляд [8]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (1)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – коефіцієнти регресійної залежності.

Для обчислення коефіцієнтів регресійної моделі (1) має бути відтворено 8 чисельних експериментальних ситуацій. Результати чисельних експериментів для реалізації розрахунків повинні бути отримані за ортогональним планом, що відповідає матриці плану, яка представлена в табл. 2.

Таблиця 2 – Матриця ортогонального плану повнофакторного експерименту

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Для розрахунків під час проведення повнофакторного експерименту був застосований математичний апарат, що описаний в [1, 4]. Також застосовано обчислювальну методику розрахунку несучої здатності сталевих балок із визначеними конструктивними параметрами [1, 4]. Загальні конструктивні параметри сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням та механічні характеристики конструкційної сталі балок систематизовано в табл. 3.

Таблиця 3 – Основні параметри сталевих балок із вогнезахисним облицюванням на основі мінераловатних плит

Параметр	Позначення	Значення	Од. виміру
Геометричні розміри: – ширина перерізу; – висота; – ширина захисного шару; – довжина	$b$ $h$ $d$ $l$	100 200 (див. табл. 1) 6000	мм
Матеріал покриття	Мінераловатні пластини		
Густина сталі	$\rho_c$	7860	кг/м <sup>3</sup>
Густина мінераловати	$\rho_v$	200	кг/м <sup>3</sup>
Теплофізичні характеристики		[5]	
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Гранична міцність сталі	$f_{c,0,k}$	245	МПа
Середній модуль пружності сталі	$E$	$2 \cdot 10^5$	МПа

На підставі конструктивних параметрів сталевих балок, що подані в табл. 2, відповідно до матриці ортогонального плану за табл. 1, виконано обчислення. Одержано межі вогнестійкості досліджуваних сталевих балок із вогнезахисним облицюванням на основі мінераловатних плит. Результати проведених обчислень систематизовано в табл. 4.

Таблиця 4 – Межі вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням за результатами повнофакторного експерименту

Експериментальна ситуація	1	2	3	4	5	6	7	8
Межа вогнестійкості без відшарування, $U_{1i}$ , хв.	122	154	69	119	141	181	102	133
Межа вогнестійкості з відшаруванням, $U_{2i}$ , хв.	48	86	24	56	64	106	35	69
Час відшарування вогнезахисного облицювання, $t_c$ , хв.	44,1	78	22,5	49	52	91	32	57

На основі показників табл. 2 визначено коефіцієнти регресійної залежності (1) із використанням формул, які наведені нижче [8]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i ; b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i ; b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i ;$$

$$b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i ; b_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i ; \quad (2)$$

$$b_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i ; b_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i ; b_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i ,$$

де  $N = 8$  – кількість експериментів згідно з планом;

$x_i$  – величина параметру відповідно до матриці плану (див. табл. 1);

$y_i$  – величина похибки межі вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням за табл. 3.

Результати обчислень щодо розрахунку коефіцієнтів регресії подано в табл. 5.

Таблиця 5 – Коефіцієнти регресії для часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевієї балки

Коефіцієнт	$b_0$ ,	$b_1$ ,	$b_2$ ,	$b_3$ ,	$b_4$ ,	$b_5$ ,	$b_6$ ,	$b_7$
Значення (кодовані)	53,2	-15,55	13,075	-4,8	-2,675	0,45	-0,425	0,825
Значення (реальні)	44,4	-0,0599	0,725	-4,813	$-8,76 \cdot 10^{-3}$	-0,0314	-0,178	$6,29 \cdot 10^{-4}$

Проведено повний факторний експеримент із використанням розроблених методик визначення несучої здатності сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, на основі чого виявлені закономірності й побудована математична модель зміни часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання, залежно від

коефіцієнта перерізу, товщини мінераловатного облицювання та рівня навантаження, що має вигляд:

$$t_c = 44,4 - 0,0599 \cdot A/V_m + 0,725 \cdot d - 4,813 \mu_f - 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot A/V_m \cdot d - 0,0314 \cdot A/V_m \mu_f - 0,178 \cdot d \cdot \mu_f + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \mu_f \quad (3)$$

Унаслідок застосування одержаної регресійної залежності, відтворено поверхні залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталевих балок від вибраних найбільш значущих конструктивних параметрів, у ході завдання різних значень товщини вогнезахисного облицювання, які подані на рис. 2. На побудованих поверхнях зображено рівні, що відповідають різним значенням часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання.

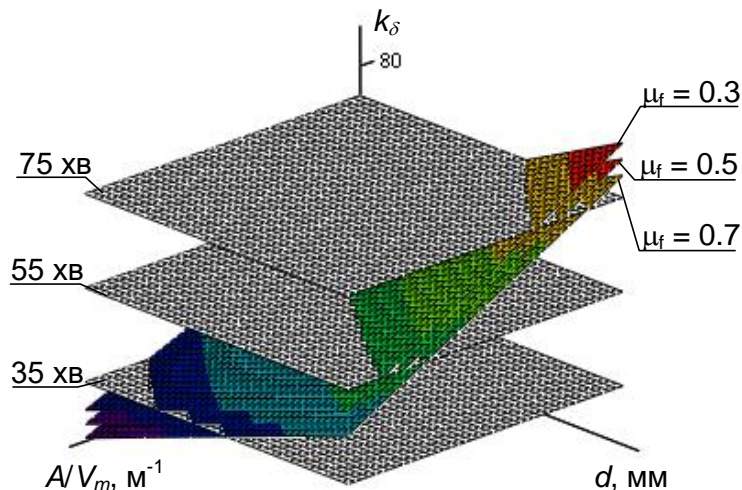


Рисунок 2 – Поверхні залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання для визначення межі вогнестійкості сталевих балок для різних значень діючого навантаження

Для вивчення впливу найбільш значущих конструктивних параметрів сталевих балок на час відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання були побудовані взаємні залежності конструктивних параметрів за умови трьох можливих величин товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання: 25 мм, 50 мм та 75 мм, що кратні половині товщини мінераловатної плити. На рис. 3 подано одержані номограми.

Отримані дані дають змогу визначити межі вогнезахисту балок з урахуванням відшарування мінераловатного облицювання для забезпечення необхідної нормованої вогнестійкості.

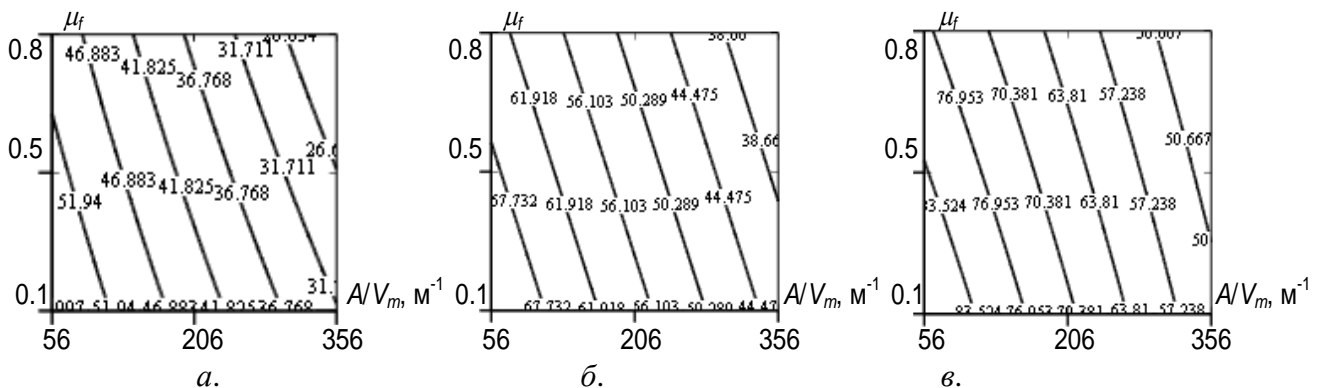


Рисунок 3 – Залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки від коефіцієнта перерізу та коефіцієнта навантаження для різних значень його товщини: а – 25 мм; б – 50 мм; в – 75 мм

Отримані дані є основою розрахункової методики оцінювання вогнестійкості сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, із використанням величини часу його відшарування, визначеного за запропонованими номограмами та рекомендаціями другої частини «Єврокоду 3».

**Висновки.** Проведено повний факторний експеримент із використанням розроблених методик визначення несучої здатності сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним облицюванням, на основі чого виявлені закономірності й побудована математична модель зміни часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання, залежно від коефіцієнта перерізу, товщини мінераловатного облицювання та рівня навантаження, що має вигляд  $t_c = 44,4 - 0,0599 \cdot A/V_m + 0,725 \cdot d - 4,813 \cdot \mu_f - 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot A/V_m \cdot d - 0,0314 \cdot A/V_m \cdot \mu_f - 0,178 \cdot d \cdot \mu_f + 6,29 \cdot 10^{-4} \cdot A/V_m \cdot d \cdot \mu_f$ .

Побудовано номограми для визначення часу відшарування мінераловатного вогнезахисного облицювання сталевих балок, залежно від коефіцієнта перерізу та рівня навантаження, з огляду на три величини товщини мінераловатного вогнезахисного облицювання.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дослідження поведінки сталеві балки із вогнезахисним мінераловатним облицюванням при пожежі / Борсук О. В., Нуянзін О. М., Кришталь В. М., Ведула С. А., Горovenko М. М. // «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування»: зб. наук. праць. – Черкаси: ЧПБ НУЦЗ України, 2020. – № 2 С. 15-24.

2. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Жамойдика С. М. «Огнестойкость стальных колонн с конструктивной огнезащитой» Минск, 2017 Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Жамойдика С. М. «Огнестойкость стальных колонн с конструктивной огнезащитой» Минск, 2017.

3. Беликов А. С., Шаломов В. А., Борсук Е. В., Дзедина Е. В. Внедрение средств огнезащиты для повышения огнестойкости строительных конструкций / «Пожежна безпека: теорія і практика»: зб. наук. праць. – Черкаси: ЧПБ НУЦЗ України № 20/2015, с. 19-26.

4. Борсук О. В. Дослідження поведінки сталеві балки із вогнезахисним мінераловатним облицюванням при пожежі / О. В. Борсук // «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування»: зб. наук. праць. – Черкаси: ЧПБ НУЦЗ України, 2020. – № 1 С. 15-24.

5. EN 1993-1-2: Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Основні правила. Проектування з урахуванням вогнестійкості.– К.: Укрархбудінформ, 2012. – 77 с.

6. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.

7. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Вогнезахисні покриття для будівельних несучих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. (ENV 13381-4:2002). [Чинний від 2007-01-01.] – К.: Укрархбудінформ, 2007. – 62 с – (Національний стандарт України).

8. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.

## REFERENCES

1. Borsuk OV, Nuianzin OM, Kryshstal VM, Vedula SA, Gorovenko MM // "Emergencies: prevention and elimination" : zb. Science. wash. – Cherkasy: CHIPB NUTSZ of Ukraine, 2020. – № 2 P. 15-24.

2. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences Zhamoidika S. M. "Fire resistance of steel columns with structural fire protection" Minsk, 2017 Dissertation for the degree of candidate of technical sciences Zhamoidika S. M. "Fire resistance of steel columns with structural fire protection" Minsk, 2017.

3. Belikov AS, Shalomov VA, Borsuk EV, Dzetsina EV Introduction of fire protection to increase the fire resistance of building structures / "Fire safety: theory and practice": Coll. Science. wash. - Cherkasy: CHIPB NUTSZ of Ukraine № 20/2015, p. 19-26.

4. Borsuk OV Research of behavior of a steel beam with fire-retardant mineral wool facing at a fire / OV Borsuk // "Emergencies: prevention and liquidation": coll. Science. wash. – Cherkasy: CHIPB NUTSZ of Ukraine, 2020. – № 1 P. 15-24.

5. EN 1993-1-2: Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-2. Basic rules. Design taking into account fire resistance.– K. : Ukrarkhbudinform, 2012. – 77 p.

6. DSTU-N BV.2.6-211: 2016 Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance.

7. DSTU B B.1.1-17: 2007 Fire-retardant coatings for building load-bearing structures. Method for determining the fire retardant ability. (ENV 13381-4: 2002). [Effective from 2007-01-01.] - Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2007. - 62 p. - (National Standard of Ukraine).

8. Kramer G. Mathematical methods of statistics. M. : Mir, 1975. 648 s.

*Oleksandr Nuianzin, PhD in technical sciences, docent,  
Viktor Hvoz, PhD in technical sciences, professor,  
Serhii Pozdieiev, Doctor of Technical Science, professor,  
Olha Nekora, PhD in technical sciences, Senior Research Officer,  
Olena Borsuk, PhD in technical sciences,  
Cherkassy Institute of Fire Safety Named after Chernobyl Heroes  
of National University of Civil Defense in Ukraine*

### **STUDY OF THE TIME OF DEPENDENCE OF EXFOLIATION OF FIRE-PROTECTIVE MINERALWOLL COVERING OF STEEL BEAM ON THE CROSS SECTION COEFFICIENT AND LOAD FACTOR**

*This article continues the work on the study of heating of the steel beam and the detachment time of the fire-retardant mineral wool cladding of the steel beam. The dependence of the peeling time on the beam section coefficient and the load coefficient is studied.*

*Recently, fire protection systems for steel beams based on mineral wool cladding have become widespread. Their feature is the use of high-strength adhesive joints, resistant to temperature. But, at the same time, at mineral-wool panels of small durability there is a high probability of peeling of mineral-wool facing on its layers and as a consequence, loss of fire-retardant ability during time of influence of the standard temperature mode of fire established by the corresponding class of fire resistance. Therefore, the established compliance with a particular fire resistance class must be adjusted.*

*To calculate the coefficients of the regression model, 8 numerical experimental situations were reproduced. The results of numerical experiments for the implementation of calculations should be obtained according to the orthogonal plan.*

*To study the influence of the most significant structural parameters of steel beams on the detachment of fire-retardant mineral wool cladding, the interdependencies of structural parameters were constructed under the condition of three possible values of fire-retardant mineral wool cladding thickness: 25 mm, 50 mm and 75 mm.*

*The regularities are established and the mathematical model of change of time of exfoliation of mineral wool fire-retardant facing depending on their section coefficient  $A/V_m$ , thickness of mineral wool facing  $d$  and level of loading  $\mu_f$  is constructed, nomograms for definition of time of exfoliation load level at three values  $\mu_f$  of thickness of mineral wool fire-retardant facing.*

**Key words:** *mineral wool cladding, fire resistance, fire protection ability, steel beam, integrity of fire protection coating.*